

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

PRIMJENA KOSO USMJERENOG BUŠENJA

Diplomski rad

Ivan Frković

N159

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

PRIMJENA KOSO USMJERENOG BUŠENJA

Ivan Frković

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

SAŽETAK

Usmjereno bušenje jest proces usmjeravanja kanala prema unaprijed određenom cilju u podzemlju čije su koordinate po širini ili dužini različite od koordinate ušća bušotine. Postoje različite primjene koso usmjerenog bušenja. U radu su prikazani načini te primjeri iz domaće i svjetske prakse. Danas operateri koriste sofisticirane sklopove za usmjereno bušenje kompleksnih geoloških struktura koje su identificirane pomoću 3D seizmike. Prethodne nedostižne rezerve danas postaju dostupne i ekonomski isplative. Koso usmjereno bušenje postalo je potreba zbog praktičnih prednosti i ekonomske opravdanosti.

Ključne riječi: koso usmjereno bušenje, horizontalne bušotine, upravljivi motori, grm bušotina, višekanalne bušotine, Macondo, rasteretna bušotina

Završni rad sadrži: 55 stranica, 2 tablica, 26 slika, 36 referencu

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: 1.Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

2. Dr. sc. Katarina Simon, redoviti profesor RGNF-a

3.Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 19.9.2016. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb

Master's thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

THE APPLICATION OF DIRECTIONAL DRILLING

Ivan Frković

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Institute of Petroleum Engineering

Pierottijeva 6, Zagreb 10 000

SUMMARY

Directional drilling is defined as the practice of controlling the direction and deviation of a wellbore to a predetermined underground target or location. There are different applications of directional drilling. This thesis presents the methods and the examples of domestic and international practices for each type of the well. Today, operators use a sophisticated assembly for directional drilling of complex geological structures that have been identified using the 3D seismic. The previously unreachable reservoirs are becoming available and economically viable. Directional drilling has become a necessity for its practical benefits and economic reasons.

Key words: directional drilling, horizontal wells, RSS, well cluster, multilateral wells, Macondo, relief-well, sidetrack

Master's thesis contains 55 pages, 2 tables, 26 figures, 36 references.

Original in: Croatian

Master's thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Zdenko Krištafor, PhD.

Reviewers: 1. Full Professor Zdenko Krištafor, PhD.

2. Full Professor Katarina Simon, PhD.

3. Assistant professor Borivoje Pašić, PhD.

Date of defense: September 19th, 2016

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Prvo želim zahvaliti svojim roditeljima Jelki i Marijanu i bratu Pavi na svim oblicima podrške tijekom mog školovanja. Da nije njih i njihove podrške sve ovo ne bi bilo moguće. Hvala Vam puno na svemu.

Zahvaljujem profesoru Zdenku Kristaforu na stručnom vođenju te kritikama i pohvalama koje su uvijek bile poticajne tijekom izrade ovog diplomskog rada, ali i tijekom cijelog studiranja.

Hvala svim profesorima na fakultetu koji su moje studiranje učinili zanimljivim, teškim i nezaboravnim.

Prijatelji s faksa, hvala Vam, studiranje uz Vas je bilo najljepše studiranje.

I na kraju jedno veliko hvala mojoj Heleni.

Sadržaj

Popis slika.....	II
Popis tablica.....	IV
Popis korištenih oznaka i kratica	V
1. UVOD	1
2. PRIMJENA KOSO USMJERENOG BUŠENJA	3
2.1. Nedostupna mjesta.....	3
2.1.1. Tijek izrade kanala bušotine Kal-21	7
2.2. Više bušotina na jednom mjestu - grm bušotina	14
2.2.1. Naftno-plinsko polje Bilogora	14
2.2.2. Eksploatacijsko polje Sjeverni Jadran	16
2.3. Horizontalno bušenje kroz naftonosne kolektore	23
2.3.1. Horizontalne bušotine.....	23
2.3.2. Bušotine velikog dosega	29
2.4. Izrada bočnog kanala iz postojećeg kanala bušotine.....	31
2.5. Izrada rasteretne bušotine	38
2.6. Vraćanje bušotine u željeni pravac	43
2.7. Zasijecanje bočnog kanala	46
2.8. Višegranske ili višekanalne bušotine.....	50
3. ZAKLJUČAK	52
4. LITERATURA	53

Popis slika

Slika 2-1. Ležišta nafte i plina koja se nalaze na „nedostupnim mjestima“	3
Slika 2-2. Geološko fizikalni projekt za bušotinu Kalinovac-21.....	4
Slika 2-3. Prikaz trajektorije bušotine Kalinovac - 21 projektirane u programu Landmark .	6
Slika 2-4. Grm bušotina na kopnu	14
Slika 2-5. Situacijska karta proizvodnih platformi i plinskih polja Sjevernog Jadrana	17
Slika 2-6. Konstrukcija bušotine Vesna - 2 ver	18
Slika 2-7. Trajektorija i horizontalna projekcija bušotine Ivana E-3 hor	19
Slika 2-8. Uronjeni motor Navi Drill	20
Slika 2-9. Trajektorija i horizontalna projekcija bušotine Ana 3 dir	21
Slika 2-10. Poprečni presjek sklopa motora - PowerPak.....	22
Slika 2-11. Shematski prikaz različitih polumjera zakrivljenosti kanala bušotine.....	24
Slika 2-12. Trajektorija bušotine Ika A4 HOR.....	26
Slika 2-13. Bušotina velikog dosega	30
Slika 2-14. Postignute dubine pojedinim sastavom alata pri otvaranju prozora kroz dvije kolone zaštitnih cijevi.....	35
Slika 2-15. Planirana i ostvarena putanja bušotine Kal-10R	36
Slika 2-16. Konstrukcija bušotine Kal-10R.....	37
Slika 2-17. Platforma Deepwater Horizon u plamenu.....	38
Slika 2-18. Pozicija bušaće platforme "Deepwater Horizon" dana 20. travnja 2010	39
Slika 2-19. Prikaz četiri kritična faktora.....	40
Slika 2-20. Osam ključnih nalaza i lokacije probijenih barijera	40
Slika 2-21. Napredak rasteretnih bušotina.....	42
Slika 2-22. Geološki projekt istražne bušotine Bunjani-2J, geološki profil B-B'	44
Slika 2-23. Planirana i ostvarena putanja bušotine Bn-2J α	47
Slika 2-24. Skica bušotine Bunjani - 2 Jug i Bunjani - 2 Jug Alfa.....	49

Slika 2-25. Prva višekanalna bušotina - Bušotina 65/45	50
Slika 2-26. Oblici višekanalnih bušotina.....	51

Popis tablica

Tablica 2-1. Udjeli pojedinih troškova u cijeni izrade bušotina.....	15
Tablica 2-2. Podjela horizontalnih bušotina.....	24

Popis korištenih oznaka i kratica

A _z	azimut
BP	British Petroleum
BTC	trapezni navojni spoj (<i>engl. buttress thread connection</i>)
Hk	konačna mjerena dubina
Hv	vertikalna dubina
KOP	točka skretanja kanala bušotine (<i>engl. kick off point</i>)
Kr	kut otklona
L	devijacija ili duljina
MD	mjerena dubina (<i>engl. measured depth</i>)
R	polumjer zakrivljenosti
RTC	okrugli navojni spoj (<i>engl. round thread connection</i>)
TOC	vrh cementa (<i>engl. top of cement</i>)
TVD	stvarna vertikalna dubina (<i>engl. true vertical depth</i>)
VS	udaljenost vertikalne projekcije od ušća bušotine

1. UVOD

Svrha i cilj ovog diplomskog rada je prikazati osnovnu namjenu koso usmjerenog bušenja, razloge primjene takvog načina izrade bušotina kao i karakteristične primjere primjene u domaćoj i svjetskoj praksi.

Došlo je do mnogih značajnih poboljšanja u opremi i tehnologiji otkako je H. John Eastman, začetnik koso usmjerenog bušenja, izradio prvu usmjerenu bušotinu Alexander No 1. Stalnim i ubrzanim napretkom usmjerenog bušenja došlo je do razvoja takozvanih rotirajućih upravljivih bušačkih sklopova (*engl. rotary steerable systems-RSS*), koji su danas u primjeni.

Usmjereno bušenje jest proces usmjeravanja kanala prema unaprijed određenom cilju u podzemlju čije su koordinate po širini ili dužini različite od koordinate ušća bušotine.

Varijacije usmjerenog bušenja mogu se podijeliti u tri skupine:

1. Izrada bušotina velikog dosega (*engl. extended-reach drilling*), MD:TVD > 2;
2. Horizontalno bušenje (*engl. horizontal drilling*), kut otklona > 85 °;
3. Izrada više kanala iz jedne glavne bušotine (*engl. multiple laterals*).

Koso usmjereno bušenje definirano je kao izrada kanala bušotine pod željenim kutom otklona od vertikale. Danas je moguće kontrolirati koso usmjerene bušotine uspješno kao i vertikalne. Svake godine se povećava primjena koso usmjerenog bušenja u svijetu. Primjene usmjerenog bušenja su razne:

1. Nedostupna mjesta, bušenje iz pristupačne pod nepristupačnu lokaciju. Ležište se nalazi ispod rijeka, jezera, mora ili ispod naseljenog mjesta.
2. Više bušotina na jednom mjestu-grm bušotina (*engl. well cluster*).
3. Horizontalno bušenje kroz naftonosne slojeve ili ležišta zbog veće duljine kanala bušotine u sloju.
4. Bušenje iz neproduktivnog u produktivni sloj (izrada bočnog kanala iz postojećeg vertikalnog radi daljnje eksploatacije (*engl. re-entry*)).
5. Izrada rasteretne bušotine (*engl. relief well*) zbog stavljanja pod kontrolu bušotinu pod nekontroliranom erupcijom.
6. Vraćanje bušotine u željeni pravac.

7. Skretanje kanala (*engl. sidetracking*), nemogućnost instrumentiranja odlomljenih alatki u vertikalnom dijelu.
8. Višekanalne bušotine (*engl. multilateral wells*).

Danas operateri koriste sofisticirane sklopove za usmjereno bušenje kompleksnih geoloških struktura koje su identificirane pomoću 3D seizmike. Prethodne nedostižne rezerve danas postaju dostupne i ekonomski isplative. Koso usmjereno bušenje postalo je potreba zbog praktičnih prednosti i ekonomske opravdanosti.

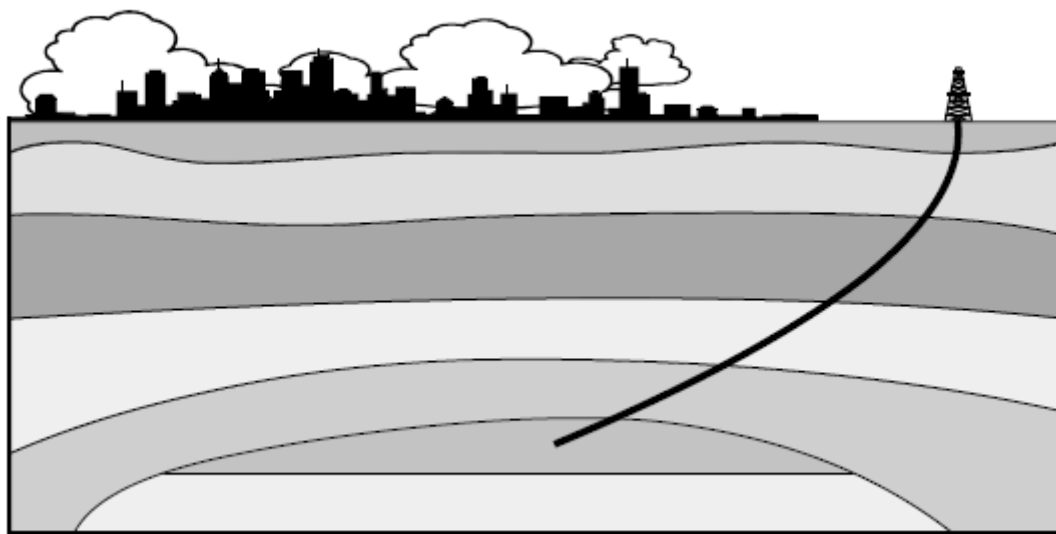
Prema podacima tvrtke INA-Naftaplin, za prvu koso usmjerenu bušotinu kod nas vodi se bušotina Klo-14β, izrađenu 1954. godine s programom usmjerenja (iako je 1952. godine kosi kanal postignut i na bušotini Nb-12a) (Krištafor, 1977).

2. PRIMJENA KOSO USMJERENOG BUŠENJA

U počecima, usmjereno bušenje je uključivalo jednostavan rotirajući bušači sklop te upravljanje parametrima režima bušenja, brzinom bušenja, geometrijskim sastavom niza alata kako bi se izradila bušotina željene putanje. Promjene u krutosti alata, smještaju stabilizatora, brzini bušenja, opterećenju na dlijeto, promjeru kanala, kutu bušenja i karakteristikama formacije utječu na sposobnost i efikasnost dubinskog bušačkog sklopa (*engl. bottomhole assembly – BHA*).

2.1. Nedostupna mjesta

Usmjereno bušenje se često primjenjuje kod nedostupnih lokacija, kada se do ležišta ne može doći vertikalnim bušotinama, bilo da se radi o prirodnim ili umjetnim preprekama koje je izgradio čovjek (slika 2-1).

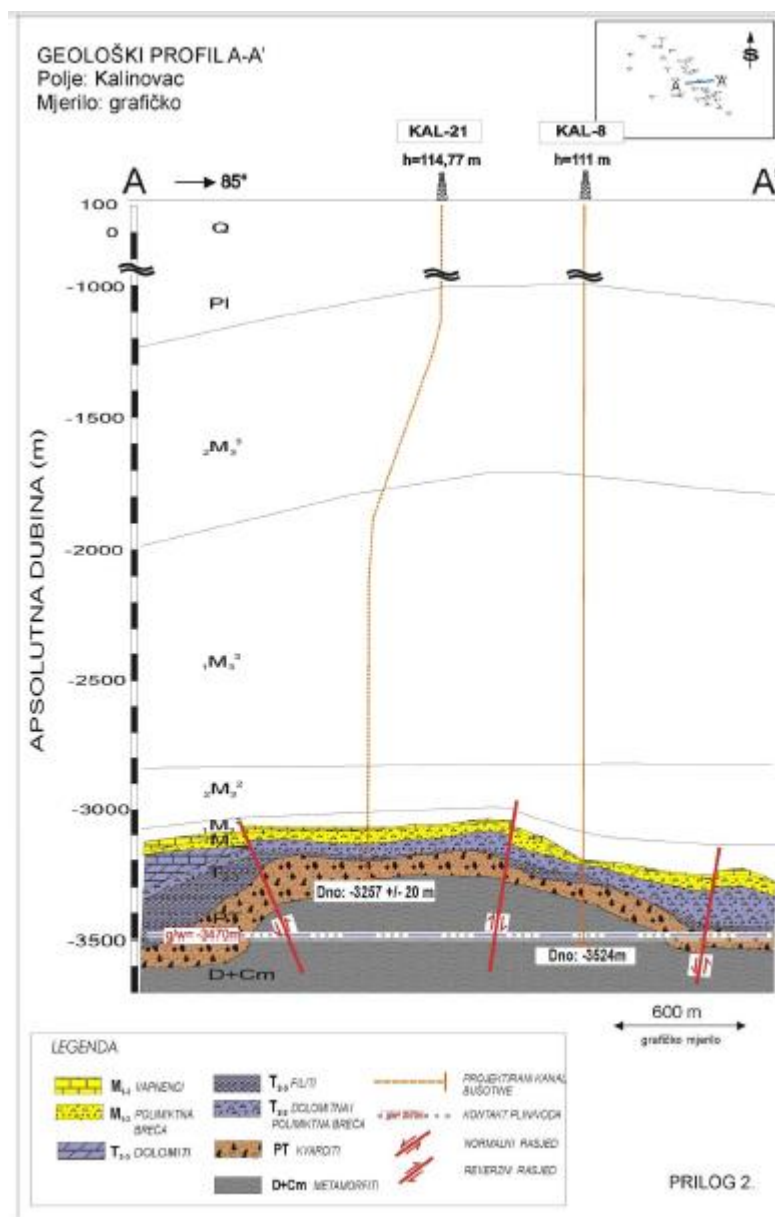


Slika 2-1. Ležišta nafte i plina koja se nalaze na „nedostupnim mjestima“ (Shahzad, 2016)

Za primjer bušenja ispod nedostupnog mjesta razmatrati će se koso-usmjerena bušotina Kalinovac-21 koja je izbušena na plinsko-kondenzatnom polju Kalinovac. Polje se nalazi u sjeverozapadnom području Dravske depresije, u blizini sela Kalinovac i Podravske Sesvete. Udaljeno je oko 100 km od Zagreba u smjeru sjeveroistoka.

Nakon lociranja bušotine na terenu došlo je do promjene koordinata ušća bušotine u odnosu na projektni zadatak bušotine Kal-21. Bušotina je izrađena kao kosa s

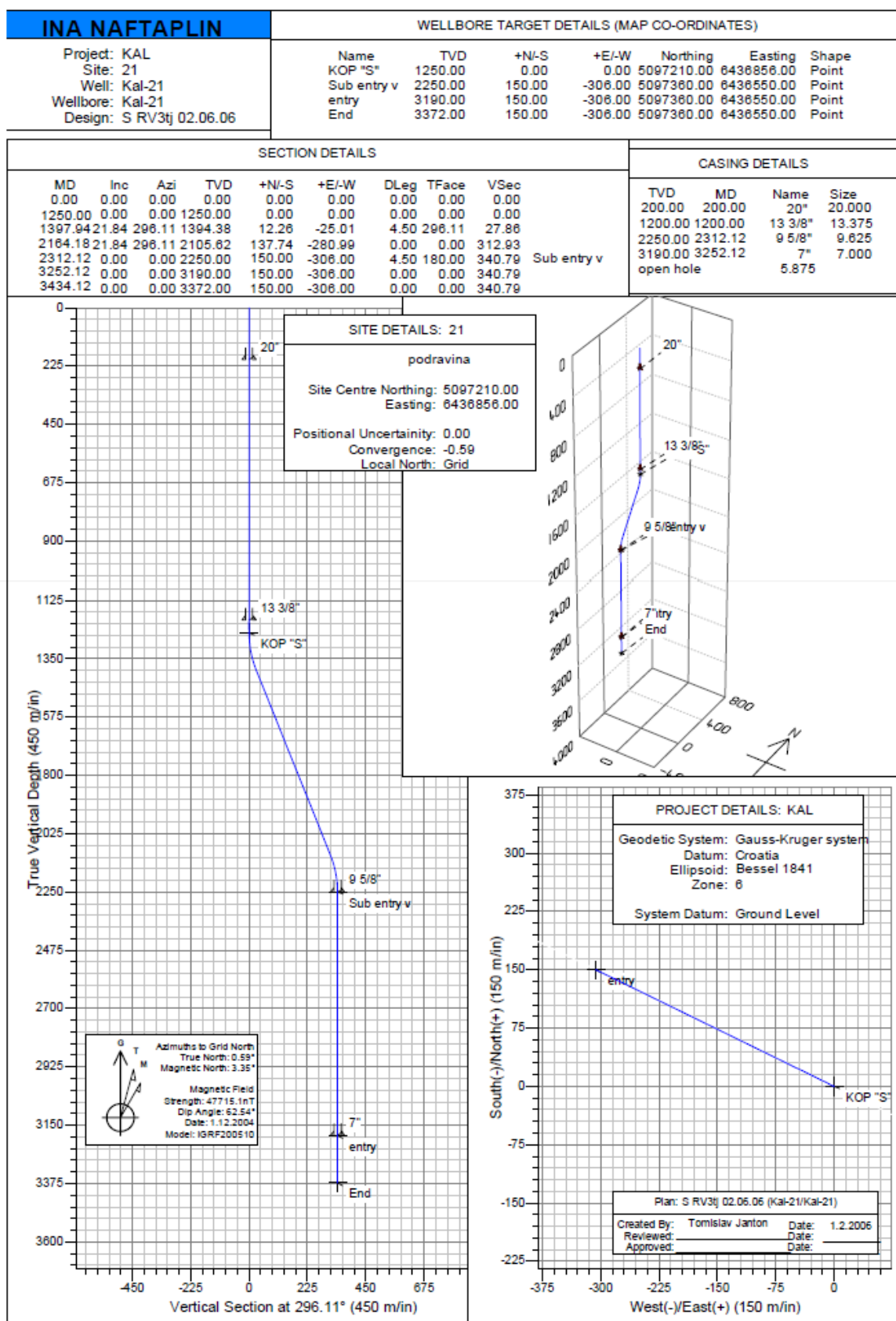
promijenjenim koordinatama ušća dok se koordinate ulaska u ležište ne mijenjaju. Geološki profil za bušotinu Kalinovac-21 prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2. Geološko fizikalni projekt za bušotinu Kalinovac-21 (Pojednostavljeni rudarski projekt za razradnu bušotinu Kalinovac-21 (Kal-21), 2006)

Ušće bušotine Kal-21 pomaknuto je 340 m na jugoistok zbog blizine zaštićenog područja „Crni jarki“, rezervat šumske vegetacije zaštićen zbog crne johe. Bušotina je smještena u centralnom dijelu polja Kalinovac, između bušotina Kal-3R2, Kal-12, Kal-8 i Kal-19. Na osnovi novog strukturnog rješenja, dobivenog nakon interpretacije 3D seizmike, odlučeno je da se izradi kosi kanal bušotine Kal-21 na plići dio strukture polja Kalinovac, unutar hidrodinamičke jedinice II koja ima dobra kolektorska svojstva.

Pokrovne stijene ležišta Kalinovac, u području bušotine Kal-21, su glinoviti i kalcitni mudstone. Mehanička, fizička i dinamička svojstva glinovitog i kalcitnog mudstone-a zadovoljavaju kriterije dobrih pokrovnih stijena. Unutar pješčenjaka iznad pokrova ležišta moguće su pojave novog plina tijekom bušenja. Bušotinom Kal-21 nabušilo se ležište Kalinovac (na približnoj dubini od 3252 +/- 20 m), a bušotina proizvodi iz otvorenog kanala – vertikalne debljine oko 182 m. Prikaz trajektorije bušotine Kal-21 dobivena je primjenom računalnog programa Landmark koji je u upotrebi u tvrtki INA-Naftaplin (slika 2-3).



Slika 2-3. Prikaz trajektorije bušotine Kalinovac - 21 projektirane u programu Landmark (Pojednostavljeni rudarski projekt za razradnu bušotinu Kalinovac-21(Kal-21), 2006)

2.1.1. Tijek izrade kanala bušotine Kal-21

Bušenje kanala bušotine dlijetom promjera 660,4 mm (26") za ugradnju kolone zaštitnih cijevi promjera 508 mm (20")

Bušenje kanala bušotine dlijetom promjerom 660,4 mm (26") za kolonu zaštitnih cijevi 508 mm (20") započelo je 22.10. 2006. Na dubini od 62 m alat je izvađen iz bušotine i ugrađeni su stabilizatori, neposredno iznad dlijeta i na 9 m iznad dlijeta. Nastavljeno je bušenje dlijetom promjera 660,4 mm (26") sljedećim režimom: opterećenjem na dlijeto od 1 do 2 t, 50-100 o/min, 0,0353 m³/s. Napreci su bili veći od 5 m/h. Na dubini od 169 m dostignuta je konačna dubina za ugradnju kolone zaštitnih cijevi te je uslijedilo mjerenje kuta inklinometrom. Ugrađena je kolona zaštitnih cijevi promjera 508 mm (20"), jedinične mase 158,49 kg/m, J-55 od 167,5 do 103 m ; te zaštitne cijevi 197,93 kg/m J-55 od 103 do 0,0 m. Nakon uspješne cementacije s 5 m³ cementne kaše na površini, pričekalo se na stvrdnjavanje cementa 18 h, te je izvedeno ispitivanje hermetičnosti.

Bušenje kanala bušotine dlijetom promjera 444,5 mm (17 1/2") za ugradnju kolone zaštitnih cijevi promjera 339,7mm (13 3/8")

Nakon ispitivanja hermetičnosti nastavljeno je bušenje, cementa i pete kolone (od 164 do 169 m). Nakon bušenja cementa i pete kolone, nastavljeno je bušenje u novu naslagu ("zdravicu") - do 192 m kada je nakon ispiranja izvađen alat iz bušotine radi ugradnje stabilizatora i novog dlijeta s mlaznicama. Bušenje je nastavljeno dlijetom promjera 444,5 mm (17 1/2"), klasifikacijskoga koda (*engl. International Association of Drilling Contractors - IADC*) 137. do konačne dubine za ugradnju kolone promjera 339,7 mm (13 3/8") do 1205 m. Prosječna mehanička brzina bušenja iznosila je 8,04 m/h. Nakon bušenja izvađen je bušaći alat i obavljeno elektrokarotžno mjerenje. Nakon pripreme bušotine počelo se s ugradnjom zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm (13 3/8"). Kolona 339,7 mm (13 3/8"), (107,15 kg/m; N-80; od 1203 do 144 m, te 101,20 kg/m; P-110 od 144 do 0,0 m) ugrađena je do dubine 1203 m, s protupovratnim ventilom na 1177,7 m. Nakon cementacije i čekanja na stvrdnjavanje cementa kompletiran je i spušten alat za nastavak bušenja cementa. Bušenje je nastavljeno do 1185 m te je nakon ispiranja započelo ispitivanje hermetičnosti kolone 339,7 mm (13 3/8") tlakom od 100 bar.

Bušenje kanala bušotine dlijetom promjera 311,2 mm (12 1/4") za ugradnju kolone zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (9 5/8")

Nakon ispitivanja hermetičnosti nastavljeno je bušenje cementa do 1205 m, te je zabušeno 1 m u nove naslage, do 1206 m gdje je obavljeno ispitivanja popuštanja formacije (*engl. Leak Off Test - LOT*). Nastavljeno je bušenje istim alatom do 1244 m gdje je zamijenjena isplaka novom KCl - polimernom isplakom. Ispitana je hermetičnost sapničkog razdjelnika (*engl. choke manifold*), unutarnji i vanjski ventili na vodovima za gašenje i prigušivanje, mehanička i hidraulička sapnica na tlaku od 150 bar u trajanju od 15 min. Tijekom čega nije zabilježen pad tlaka. Kompletiran je i spušten alat za usmjereno bušenje s dubinskim vijčanim motorom i telemetrijskim sklopom. Bušenje je započelo s dlijetom IADC klasifikacijskoga koda 137. Na dubini 1240m (točka skretanja - "KOP") započeto je povećanje kuta otklona sa izgradnjom sekcije za povećanje kuta (*engl. build up*). Bušenje kliznim (*engl. slide*) i rotirajućim (*engl. rotary*) načinom rada proteklo je bez poteškoća. Završetkom bušenja sekcije povećanja kuta na 1402 metara ostvaren su elementi usmjeravanja: kut otklona iznosio je 21,50°, a azimut 296,90°. Nakon cirkulacije, prije vađenja alata uslijedilo je pročišćavanje intervala od 1402 - 1394 m. Prosječna mehanička brzina bušenja sekcije povećanja kuta otklona iznosila je 4,10 m/h.

Sastav alata za bušenje sekcije povećanja kuta bio je sljedeći:

1. dlijeto promjera 0,3112 m (12 1/4");
2. upravljivi dubinski motor (*engl. steerable motor assemblies*) 0,1683 m (6 5/8");
3. stabilizator bušaće kolone (*engl. string stabilizer*) 0,3080 m (12 1/8");
4. nemagnetska teška šipka (*engl. nonmagnetic drill collar*) 0,2096 m (8 1/4");
5. prijelaz promjera 0,2096 m (8 1/4");
6. teške šipke, 5 komada promjera 0,2096 m (8 1/4");
7. udarač promjera 0,2096 m (8 1/4");
8. teška šipka, 1 komada promjera 0,2096 m (8 1/4");
9. prijelaz promjera 0,2096 m (8 1/4");
10. cirkulacijski prijelaz (*engl. circulate sub*) promjera 0,1651 m (6 1/2");
11. teške bušaće šipke, 5 pasova promjera 0,1270 m (5").

Kompletiran i spušten alat (uz nadopunjavanje bušačim šipkama) za nastavak bušenja tangencijalne sekcije. Ugrađeno je polikristalno dijamantsko bušaće dlijetom (PDC) IADC koda M323. Zbog stalnog pada kuta otklona putanja kanala bušotine odlučeno je da se alat izvadi iz bušotine i u bušotinu spusti alat s mogućnošću jačeg održavanja kuta. Prosječna mehanička brzina bušenja u tangencijalnoj sekciji PDC dlijetom do 1800 m iznosila je 9,55 m/h. Korekcija kuta otklona (zbog konstantnog pada) obavljena je krutim alatom sastavljenim za tu namjenu i žrvanjskim dlijetom sa zubima koda 137 u intervalu od 1800 do 1846 m. Bušači alat koji je spušten u bušotinu za korekciju kuta otklona kanala bušotine izvađen je i u bušotinu je spušten bušači alat, s PDC dlijetom za nastavak bušenja pravocrtne dionice (tangencijalne sekcije). Završetak bušenja te dionice bio je na dubini od 2159 m.

Sastav alata za bušenje pravocrtne dionice:

1. dlijetom promjera 0,3112 m (12 1/4");
2. upravljivi dubinski motor promjera 0,2445 m (9 5/8");
3. stabilizator bušaće kolone promjera 0,3070 m (12 1/8");
4. nemagnetska teška šipka promjera 0,2096 m (8 1/4");
5. prijelaz promjera 0,2096 m (8 1/4");
6. stabilizator bušaće kolone promjera 0,3070 m (12 1/8");
7. teške šipke, 5 komada promjera 0,2096 m (8 1/4");
8. udarač promjera 0,2191 m (8 5/8");
9. teška šipka, 1 komad promjera 0,2096 m (8 1/4");
10. prijelaz promjera 0,2096 m (8 1/4");
11. cirkulacijski prijelaz promjera 0,1651 (6 1/2");
12. teške bušaće šipke, 5 pasova promjera 0,127(5").

Nakon toga kompletiran je i spušten alat za bušenje sekcije smanjenja kuta (*engl. drop down*) s dlijetom koda 217 kojim bi se osigurao bolji napredak bušenja te lakše smanjenje kuta. Nastavljeno je usmjereno bušenje u cilju smanjenja kuta otklona i tijekom bušenja kliznim načinom javljali se se problemi s ostvarenjem opterećenja na dlijetom, nasjedanje i propadanje niza uz povećanje tlaka. Bušenje je zaustavljeno na 2222 m, zbog malog napretka. Uslijedilo je vađenje alata iz bušotine. Izvađeno dlijetom bilo je jako

oštećeno, a prosječna mehanička brzina bušenja spomenute dionice iznosila je svega 1,48 m/h.

Kompletiran je i spušan alata za nastavak usmjerenog bušenja za smanjenje kuta. U bušotinu je spušteno dlijeto, IADC koda 216. Bušenje je nastavljeno do 2255 m kada je odlučeno da se alat zbog malog napretka izvadi iz bušotine. Prosječna mehanička brzina bušenja iznosila je 1,26 m/h.

Zatim je kompletiran je i pušten alat za nastavak bušenja do dubine 2312 m koji je sadržavao PDC dlijeto, tj. do konačne dubine za ugradnju kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8").

Kolona zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8"), jedinične mase 69,94 kg/m i kvalitete čelika N-80, ugrađena je do 2309 m dubine. Obavljena je cementacija kolone promjera 0,5080 m (20") x 0,3397 m (13 3/8"). Nakon stvrdnjavanja cementa, dograđeno je ušće i montiran preventerski sklop, te je ispitana hermetičnost. Sastavi alata korišteni za bušenje dionice za smanjenje kuta otklona prikazani su nastavku.

Sastav alata I

1. Dlijeto promjera 0,3112 m (12 1/4").
2. Upravljivi dubinski motor promjera 0,2445 m (9 5/8").
3. Stabilizator bušaće kolone promjera 0,3080 m (12 1/8").
4. Nemagnetska teška šipka promjera 0,2096 m (8 1/4").
5. Prijelaz promjera 0,2096 m (8 1/4").
6. Stabilizator bušaće kolone promjera 0,3080 m (12 1/8").
7. Teške šipke, 5 komada promjera 0,2096 m (8 1/4").
8. Udarac promjera 0,2191 m (8 5/8").
9. Teška šipka, 1 komad promjera 0,2096 m (8 1/4").
10. Prijelaz promjera 0,2096 m (8 1/4").
11. Cirkulacijski prijelaz promjera 0,1651 m (6 1/2").
12. Teške bušaće šipke, 5 pasova promjera 0,1270 m (5").

Sastav alata II

1. Dlijeto promjera 0,3112 m (12 1/4").
2. Upravljivi dubinski motor promjera 0,2445 m (9 5/8").
3. Nemagnetska teška šipka promjera 0,2096 m (8 1/4").

4. Prijelaz promjera 0,2096 m (8 ¼").
5. Teška šipka, 1 komad promjera 0,2096 m (8 ¼").
6. Stabilizator bušaće kolone promjera 0,3080 m (12 1/8").
7. Teška šipka, 1 komad promjera 0,2096 m (8 ¼").
8. Stabilizator bušaće kolone promjera 0,3080 m (12 1/8").
9. Teške šipke, 4 komada promjera 0,2096 m (8 ¼").
10. Udarac promjera 0,2191 m (8 ⅝").
11. Teška šipka, 1 komad promjera 0,2096 m (8 ¼").
12. Prijelaz promjera 0,2096 m (8 ¼").
13. Cirkulacijski prijelaz promjera 0,1651 m (6 ½").
14. Teške bušaće šipke , 5 komada promjera 0,1270 m (5").
15. Niz bušaćih šipki promjera 0,1270 m (5").

Sastav alata III

1. Dlijeto promjera 0,2159 m (8 ½").
2. Upravljivi dubinski motor promjera 0,1715 m (6¾").
3. Stabilizator bušaće kolone. promjera 0,2096 m (8 ¼").
4. Nemagnetska teška šipka promjera 0,1715 m (6¾").
5. Prijelaz promjera 0,1651 m (6 ½").
6. Cirkulacijski prijelaz promjera 0,1651 m (6 ½").
7. Prijelaz promjera 0,1651 m (6 ½").
8. Teške šipke, 9 komada promjera 0,1588 m (6¼").
9. Prijelaz promjera 0,1619 m (6⅜").
10. Udarac promjera 0,1651 m (6 ½").
11. Teške bušaće šipke, 17 komada promjera 0,1270 m (5").
12. Niz bušaćih šipki promjera 0,1270 m (5").

Kompletiran je i spušten alat za bušenje cementa i 5 m u novu stijenu. Čep za cementaciju nalazio se je na 2296 m. Nakon ispitivanja hermetičnost, nije zabilježen pad tlaka.

Bušenje kanala bušotine dlijetom promjera 215,9 mm (8 1/2'') za kolonu zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm (7'')

Bušenje je nastavljeno do 2317 m, odnosno 5 m ispod pete kolone. Obavljen je LOT, nakon čega je nastavljeno bušenje s ciljem daljnjeg smanjenja kuta otklona dlijetom IADC koda 237. Bušenje je zaustavljeno na 2367 m radi zamjene dlijeta. Izvađeno dlijeto bilo je istrošeno, ostvarilo je prosječnu mehaničku brzinu bušenja od 1,26 m/h. Kompletiran je i spušten alat za nastavak bušenja, u bušotinu je spuštено dlijeto IADC kodne oznake 517X. Alat je spušten do dna bušotine i nastavljeno je usmjereno bušenje do 2502 m, prosječnom mehaničkom brzinom 2,94 m/h. Nakon toga pristupilo se vađenju alata iz bušotine koje je proteklo bez poteškoća. Izmijenjen je sastav alatki i spušten je u bušotinu u cilju pročišćavanja intervala 2449 – 2502 m. U bušotinu je spuštено PDC dlijeto IADC M433. Bušenje je nastavljeno do 2882 m. Zatim je izvađen alat i dlijeto kojim se bušilo prosječnom mehaničkom brzinom 3,5 m/h. Kompletiran i spušten alat za nastavak usmjerenog bušenja od 2882 - 3103 m došlo je do učestalih povećanja torzije i zaustavljanja rotacije vrtaćeg stola te povremenih zaglava. Problem povremenih zaglava rješavan je upotrebom udarača. Nakon aktiviranja udarača alat se odmah oslobađao. Bušenje je nastavljeno do 3151 m kada je bušotina zatvorena zbog dotoka plina. Uslijedilo je otežavanje isplake te gušenje bušotine.

Nakon saniranja dotoka nastavljeno je bušenje do 3240 m. Postignuti su sljedeći elementi usmjeravanja bušotine:

$H_k = 3225$ m, $H_v = 3162$ m, $K_r = 2,3^\circ$, $A_z = 34,2^\circ$, $VS = 345.15$ m

Obavljeno je elektrokarotažno mjerenje, te je obavljena priprema za ugradnju kolone promjera 177,8 mm. Ugrađena je kolona zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm, jedinične mase 47,62 kg/m, L-80 do 3237 m, s protu-povratnim ventil na 3223,67 m. Cementacija kolone zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm (7'') obavljena Perkinsovom metodom uz vršnu i repnu cementnu kašu.

Ispitana je hermetičnost čeljusnog i prstenastog preventera, ventila, tlačnih vodova i razdjelnika. Nakon toga slijedilo je kompletiranje i spuštanje krutog alata za bušenje cementa (dlijeto, IADC koda 217), te uvlačenje i spuštanje bušačih šipki do 1500 m. Nakon ispitivanja hermetičnosti, alat za bušenje cementa spušten je do 3200 m. Pokušaj cirkulacije na 3200 m bio je neuspješan zbog začepjenja dlijeta. Zatvoren je prstenasti

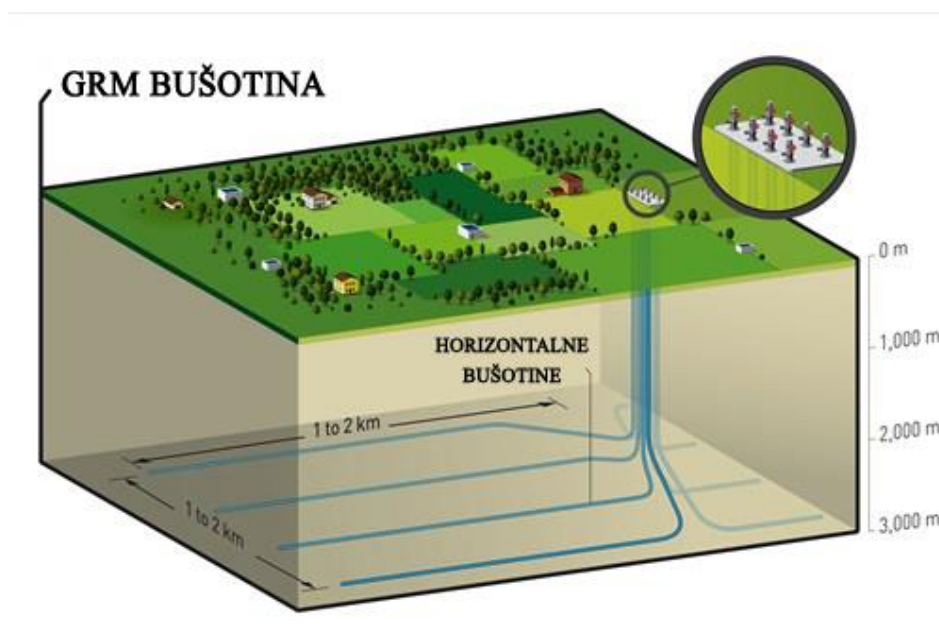
preveniter, uspostavljena reversna cirkulacija, a zatim i direktna cirkulacija. Uz cirkulaciju alat je spušten do nasjeda na 3221 m, te je izbušen cementa od 3221 do 3225 m.

Bušenje otvorenog dijela kanala dlijetom promjera 149,2 mm (5 7/8")

Nastavljeno je bušenje cementa i pete dlijetom IADC koda 217, od 3225 do 3239 m, kada je bušenje zaustavljeno i započelo se s cirkulacijom prije zamjene isplake. Izvršena je zamjena polimerne isplake s isplakom za bušenje produktivne formacije (*engl. drill in fluid*) te je nastavljeno bušenje u do 3245 m. Bušenje je zaustavljeno radi uzimanja uzoraka. Zatim je nastavljenobušenje do 3292 m, nakon čega je uslijedilo cirkuliranje isplake određeno vrijeme. Prema geološkom praćenju ležište „Kalinovac“ (brečokonglomerat) nabušeno je na 3287 m (napredak je povećan sa 1,0-1,3 m/h na 3,6-5,3 m/h). Kompletiran je i spušten bušaći alat za nastavak bušenja, za pročišćavanje intervala od 3261 do 3292 m i nastavak bušenja do konačne dubine bušotine Kalinovac 21, odnosno do 3470 m.

2.2. Više bušotina na jednom mjestu - grm bušotina (*engl. well cluster*)

Grm bušotina je grupa bušotina izbušenih s jednog, zajedničkog, mjesta radi uštede vremena i novca. Takav način razrade ležišta ugljikovodika ukazuje na niz prednosti. Korištenjem jednog temelja za više ušća bušotina omogućeno je dohvaćanje, odnosno bušenje serija tektonskih blokova (slika 2-4). Time se ostvaruju vrijedni tehno-ekonomski rezultati. Prednosti bušenja iz grmova uključuju uštede na izgradnji sabirno-transportnog sistema, manje uništavanje šumsko-poljoprivrednih zemljišta, manje otpadnih voda, a time i brigu o zaštiti čovjekove okoline te veće novčane uštede.



Slika 2-4. Grm bušotina na kopnu (<http://en.skifergas.dk>)

Potrebno je razlikovati pojam grm bušotine kad se radi o izradi bušotina na kopnu i na moru. Za primjer na kopnu odabrano je naftno-plinsko polje Bilogora, dok će se na moru razmatrati izrada grma bušotina na eksploatacijskom polju Sjeverni Jadran.

2.2.1. Naftno-plinsko polje Bilogora

Naftno-plinsko polje Bilogora nalazi se na centralom dijelu Bilogorskog masiva. U morfološkom pogledu teren je brdovit, ispresijecan oštrim jarcima i vododerinama. Nadmorska visina je između 170 i 240 metara. Oko 90% terena je obraslo visokom šumom.

Polje Bilogora ima dobre prometne veze s Bjelovarom. Koriste iste se ceste kao i za polje Šandrovac. Radi nepovoljne konfiguracije terena gradile su se platforme sa po nekoliko ušća i bušile koso usmjerene bušotine. Na polju Bilogora izrađivano je od 2 do 7 bušotina u grmu. (Krištafor, 1977)

Ako se promatra idealan slučaj izrade koso usmjerenih bušotina iz jednog grma mogle bi se očekivati slijedeće uštede:

- na otkupu zemljišta i sječi šume;
- na izgradnji puteva;
- na izradi temelja za postrojenje;
- na transportu bušačkog postrojenja;
- na montaži i demontaži bušačkog postrojenja;
- na zaštitnim cijevima;
- na amortizaciji;
- na indirektnim troškovima.

Koliko se od toga ostvaruje ovisi o mnogo faktora koji su specifični za svaki grm pa čak i za svaku bušotinu posebno. U tablici 2-1 prikazani su pojedini troškovi bušotina.

Grmovi bušotina na polju Bilogora, označeni su slovima abecede. Primjerice, grm A sadrži 4 bušotine: Bl-20, Bl-20 α , Bl-20 β i Bl-21.

Tablica 2-1. Udjeli pojedinih troškova u cijeni izrade bušotina (Krištafor, 1977)

Bušotina	Bl-20	Bl-20 α	Bl-20 β	Bl-21
Sveukupni materijal izrade	11,65	18,14	41,29	21,69
Sveukupne usluge izrade	50,18	18,36	21,39	41,31
Indirektni troškovi	26,33	43,81	25,62	25,53
Amortizacija	4,11	6,84	4,01	3,98
Osobni dohoci	6,33	10,53	6,33	6,14
Zakonske i ugovorne obaveze	1,40	2,32	1,36	1,35
Ukupno	100	100	100	100

Bušotina Bl-20 prva je u grmu i zbog toga je bilo potrebno izgraditi pristupne puteve, temelje i sve ostalo što objedinjuje stavka sveukupne usluge izrade (otkup zemljišta, sječa šume, transport).

Bušotina BI-20 α je koso usmjerena bušotina kod koje se iskoristio cijevima učvršćen interval uvedne kolone negativne bušotine BI-20. Skretanje se izvršilo iznad cementnog čepa, međutim niti bušotina BI-20 α nije naišla na produktivan sloj. Nju karakterizira povećanje udjela indirektnih troškova u cijeni.

Koso usmjerena bušotina BI-20 β , kao i prethodna izrađena, koristi uvednu kolonu bušotine BI-20. Kod njene izrade najveću stavku u cijeni predstavlja materijal izrade zbog toga što je bušotina pozitivna i u nju je ugrađena eksploatacijska kolona s površinskom opremom.

Na posljednjoj izrađenoj bušotini u grmu, BI-21, kosi kanal zaštićuju cijevi dvije kolone – uvedna i eksploatacijska (tehnička zbog manje dubine nije potrebna). S obzirom da bušotina ima posebno ušće te je za pomicanje tornja bila potrebna dogradnja temelja objašnjeno je dominiranje stavke sveukupne usluge izrade.

Prva bušotina grma je, u pravilu, najskuplja (kao da je zasebno izrađena) dok je svaka slijedeća zbog ostvarenih ušteda sve jeftinija (ako ih se svede na referentne dubine). Uspoređivanjem broja bušotina po pojedinim grmovima dolazi se do zaključka da su uštede veće što je veći broj bušotina u grmu. Nameće se zaključak da bi u najvećoj mogućoj mjeri na svim našim poljima trebalo primjenjivati razradu ležišta grmovima (koso usmjerenih) bušotina. (Krištafor, 1977)

2.2.2. Eksploatacijsko polje Sjeverni Jadran

Na eksploatacijskom polju Sjeverni Jadran i eksploatacijskom polju Izabela izgrađeno je 17 proizvodnih platformi sa 47 proizvodnih bušotina (slika 2-5). Trajektorija bušotina konstruirana je tako da u najpovoljnijem dijelu razotkrije ležišta prirodnog plina. Tako se razlikuju vertikalne, horizontalne i koso usmjerene bušotine koje se obzirom na konstrukciju trajektorije još dijele i na modificirane „S“ bušotine, bušotine s konstantnim povećanjem kuta otklona od vertikale i bušotine koje poslije otklonjenog dijela nastavljaju svoju putanju pravocrtno.

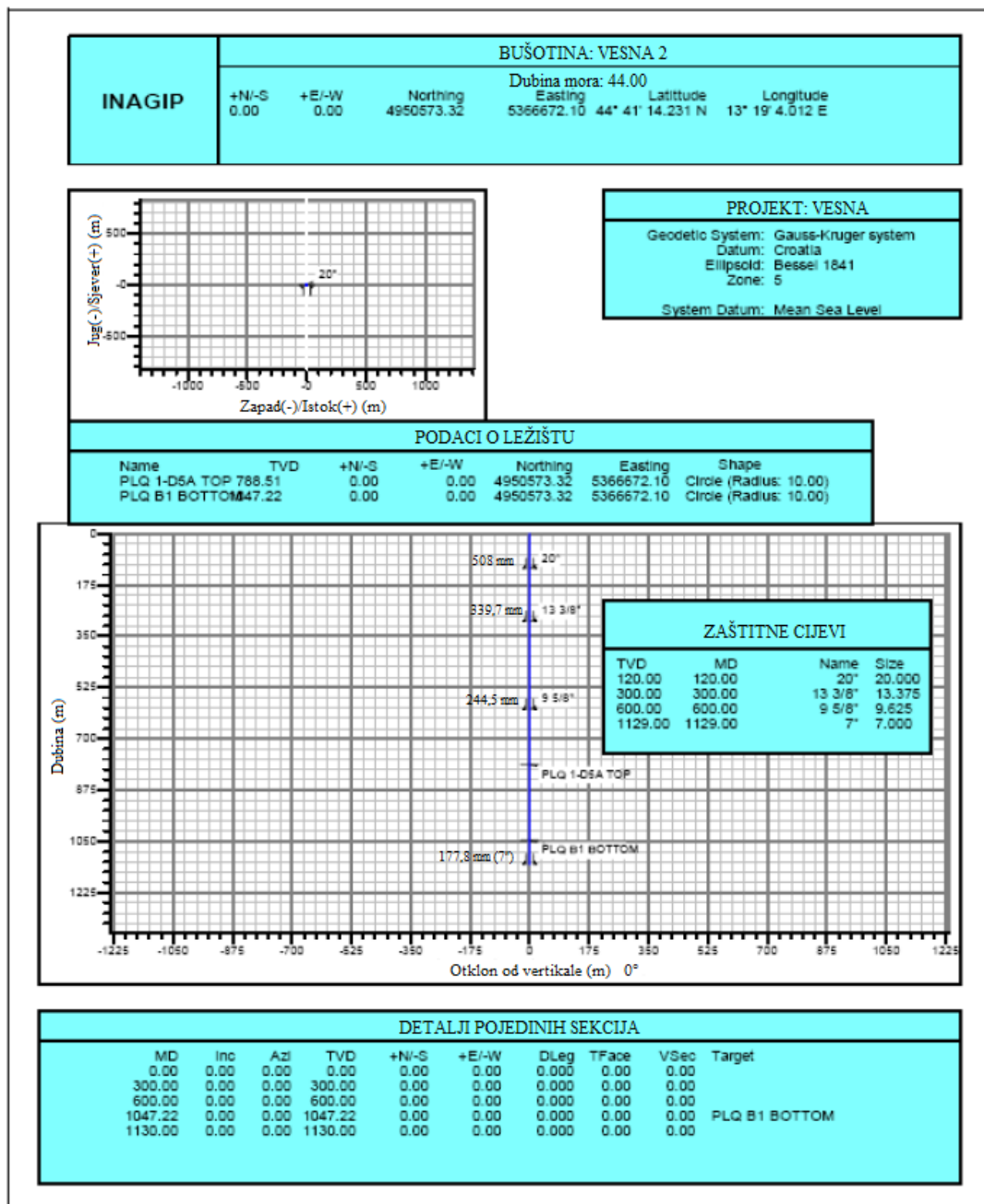


Slika 2-5. Situacijska karta proizvodnih platformi i plinskih polja Sjevernog Jadrana (Nemčić, 2016)

Na odobalnom projektu, tj. platformi s jednog mjesta izrađuje se više bušotina – grm bušotina. U takvim slučajevima za izgradnju kanala bušotina može se primijeniti koncepcija izrade po fazama u ciklusu (*engl. batch drilling mode*) koja podrazumijeva sukcesivno izvođenje više bušotina dionicu po dionicu. Takav način izrade bušotina značajno smanjuje troškove jer se u svakoj fazi izrade bušotine koristi identična oprema i alati u svakoj od njih i na taj način skraćuje se vrijeme izgradnje bušotina. Taj koncept prvi put u Hrvatskoj je primijenjen kod izrade bušotina na platformama u sjevernom Jadranu.

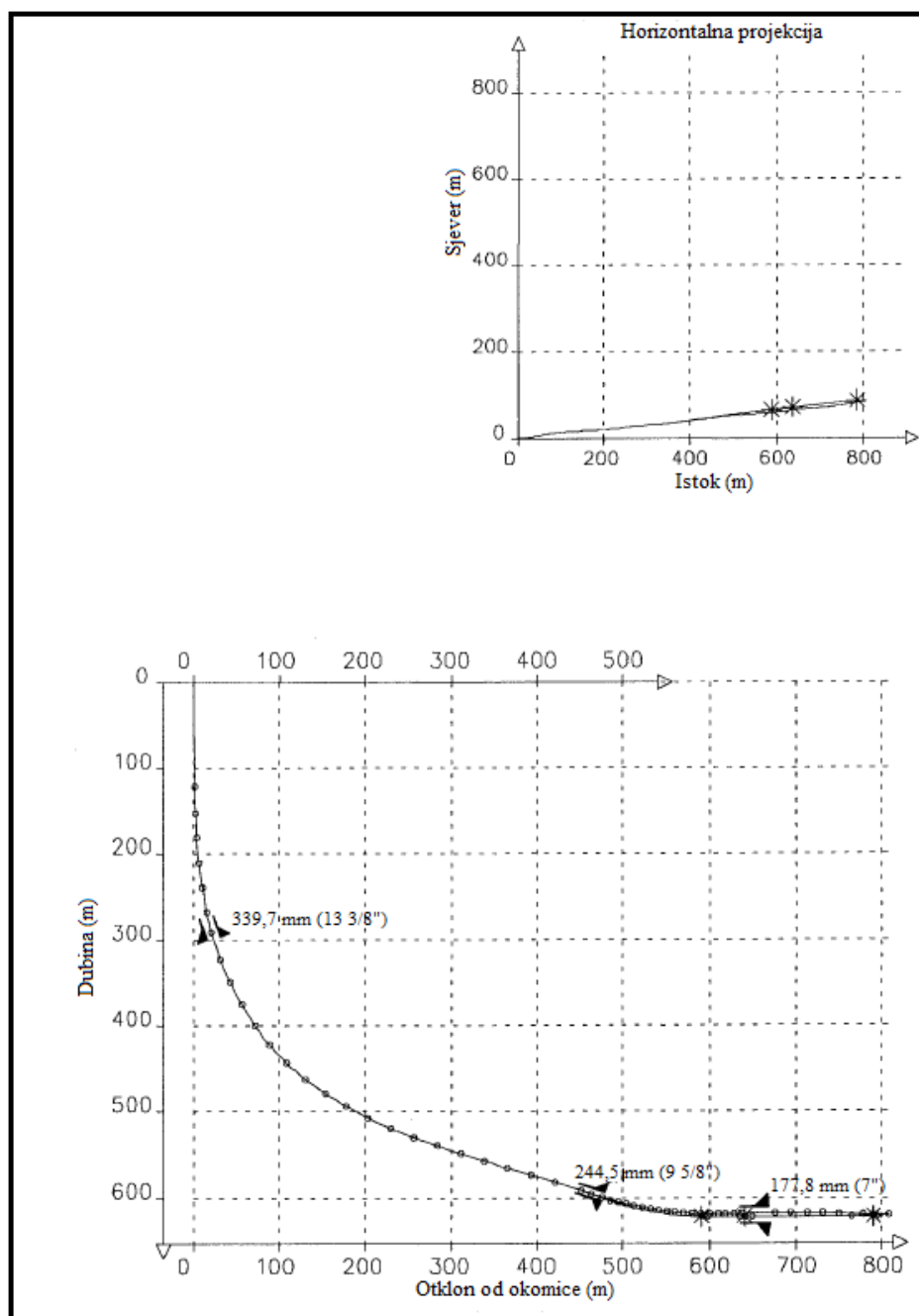
U ovom području razlikuju se sva tri tipa konstrukcije bušotina, vertikalna, koso usmjerena i horizontalna pa će za svaku od navedenih slijediti određeni komentar u

nastavku teksta. Na ovom području eksploatacijskog polja Sjeverni Jadran izrađena je samo jedna vertikalna bušotina, i to je Vesna 2 ver (Slika 2-6).



Slika 2-6. Konstrukcija bušotine Vesna - 2 ver (Završni izvještaj o bušenju i opremanju razradne bušotine Vesna - 2 ver., 2008)

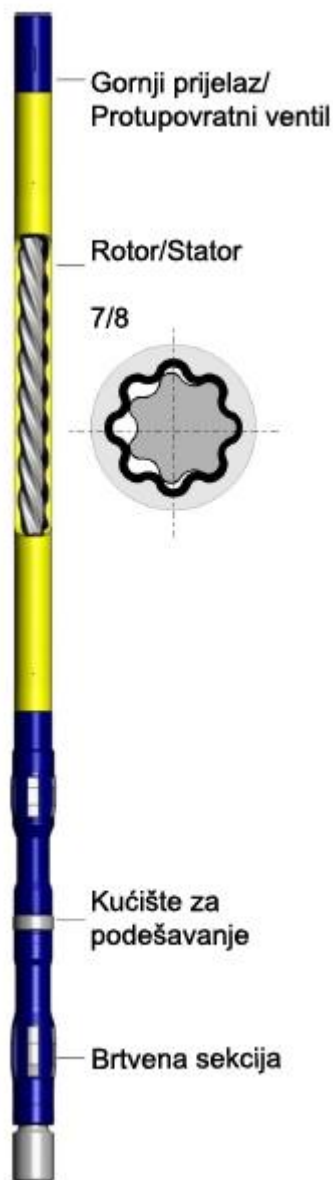
Na središnjem području eksploatacijskog polja Sjeverni Jadran izrađene su tri horizontalne bušotine, tj. 18,75% od ukupnog broja izrađenih bušotina. To su Ivana A-1 hor, Ivana E-2 hor i Ivana E-3 hor. Za tipičnu konstrukciju horizontalne bušotine prikazana je konstrukcija bušotine Ivana E-3 hor (slika 2-7).



Slika 2-7. Trajektorija i horizontalna projekcija bušotine Ivana E-3 hor (*Drilling & completion final report - IVANA E, IVANA D, IVANA B - technical data, 2001*)

Bušenje u fazi skretanja i konstantnog povećanja kuta otklona na bušotini Ivana E-3 hor izvodilo se pomoću uronjenog vijčanog motora Navi Drill Mach 1C tvrtke Baker Hughes (slika 2-8), sklopa za mjerenje tijekom bušenja (*engl. measurement while drilling - MWD*), stabilizatora i dlijeta. Uronjeni motor Navi Drill M1C koristi se tijekom bušenja usmjerenih i horizontalnih dionica. Sastoji se od pogonskog dijela u kojem je omjer

režnjeva (ispupčenja) rotora i statorske obloge 7:8, te od kućišta za podešavanje (*engl. adjustable kick off sub - AKO*) koji omogućuje podešavanje kuta otklona.



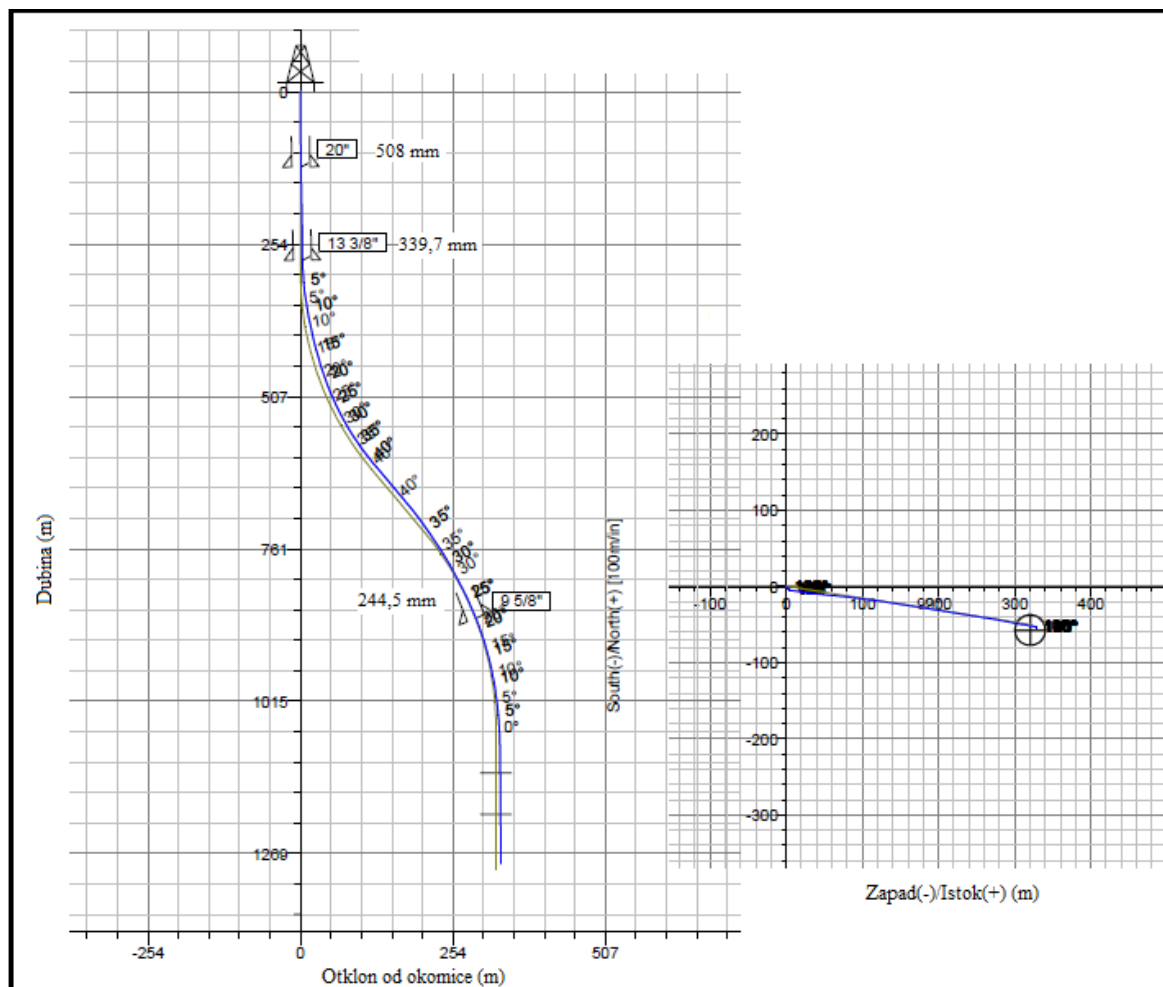
Slika 2-8. Uronjeni motor Navi Drill (Baker Hughes, 2002)

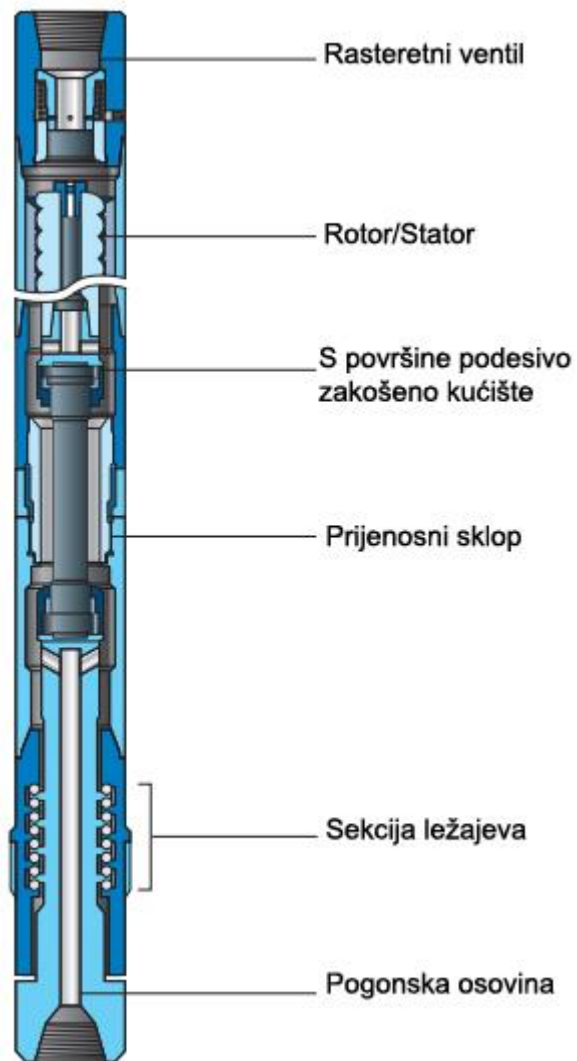
Bušenje horizontalne sekcije obavilo se s PDC dlijetom promjera 155,6 mm (6 1/8“) te uronjenim motorom Navi Drill M1X.

Sve ostale bušotine na poljima Ivana, Ana i Vesna su usmjerene bušotine. Izrađeno ih je 12, tj. 75 % od ukupnog broja izrađenih bušotina. Tipska bušotina iz ove skupine je Ana 3 dir (slika 2-9).

Bušotina Ana 3 dir ima modificirani „S“ oblik putanje kanala bušotine. Putanja bušotine sastoji se od pet dionica. Prva dionica je vertikalna sve do točke skretanja kada

započinje druga dionica s povećanjem kuta otklona kanala bušotine. U trećoj dionici zadržava postignut kut otklona. Četvrta dionica je dionica silazne zakrivljenosti i peta je opet vertikalna dionica kanala bušotine. Dno kanala bušotine nalazi se na oko 300 m horizontalne udaljenosti od proizvodne platforme.





Slika 2-10. Poprečni presjek sklopa motora - PowerPak (<http://www.slb.com/>)

2.3. Horizontalno bušenje kroz naftonosne kolektore

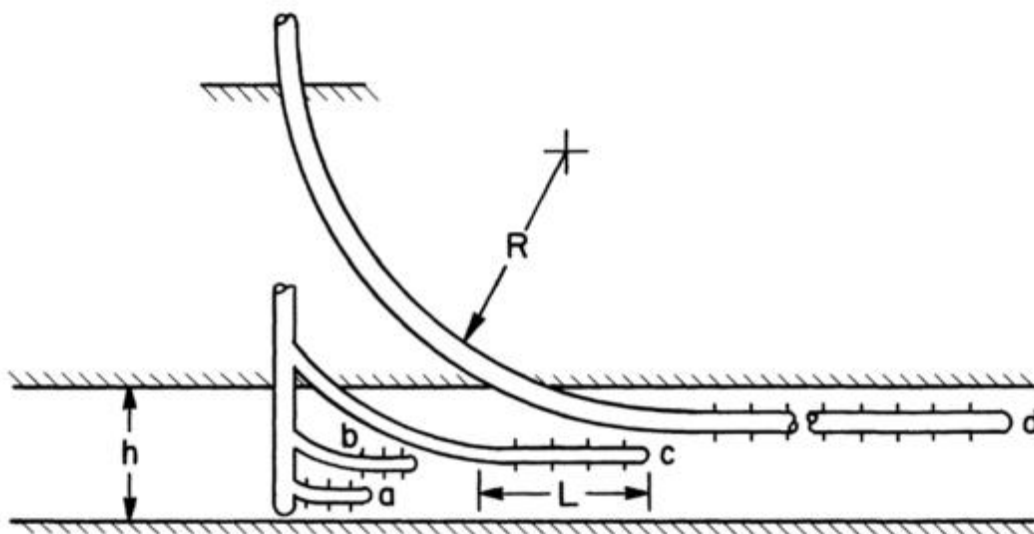
Horizontalni kanal bušotine buši se uglavnom usporedno (paralelno) s pružanjem naslaga stijena. Točnije vertikalni (uspravni) kanal bušotine je onaj koji presijeca horizontalne naslage pod kutom od 90° , a horizontalni (vodoravni) je onaj koji ide usporedno s horizontalnim naslagama (Steiner, 1994).

Za razliku od proizvodnosti vertikalnih bušotina, koja uglavnom ovisi o svojstvima probušenih stijena, kod horizontalnih bušotina proizvodnost uvelike ovisi o duljini horizontalnog dijela kanala bušotine kroz proizvodnu stijenu (Steiner, 1994).

2.3.1. Horizontalne bušotine

Horizontalnim bušotinama smatraju se sve bušotine čiji je kut otklona kanala bušotine veći od 85° . Druga definicija horizontalne bušotine navodi da se bilo koji dio kanala bušotine nakon što bušotina dosegne kut otklona od 80° smatra kao dio horizontalne bušotine, čak i kad se kut otklona smanji ispod 80° (Carden i Grace, 2007.) Prema tehnologiji izrade i tipu, horizontalne bušotine se dijele na 4 tipa (Joshi, 1991) prikazana na slici 2-11:

- s izuzetno malim polumjerom zakrivljenosti, $R=0,3$ do $0,6$ m, $L=30$ do 60 m (slika 2-11a)
- s malim polumjerom zakrivljenosti, $R=6$ do 12 m, $L=75$ do 135 m (slika 2-11b)
- sa srednjim polumjerom zakrivljenosti, $R=40$ do 210 m, $L=600$ do 1200 m (slika 2-11c)
- s velikim polumjerom zakrivljenosti, $R=300$ do 1000 m, $L=300$ do >1500 m (slika 2-11d)



Slika 2-11. Shematski prikaz različitih polumjera zakrivljenosti kanala bušotine (Joshi, 1991)

Također treba spomenuti i podjelu horizontalnih bušotina prema Chenu (2006), koji je podijelio horizontalne bušotine u tri tipa:

Tablica 2-2. Podjela horizontalnih bušotina (Chen, 2006)

TIP BUŠOTINE	POVEĆANJE KUTA OTKLONA	POLUMJER ZAKRIVLJENJA
		[m]
Veliki polumjer zakrivljenosti	2-6 [°/30m]	900-290
Srednji polumjer zakrivljenosti	6-35 [°/30m]	290-50
Mali polumjer zakrivljenosti	5-10 [°/m]	12-6

Vidljivo je da se podaci neznatno razlikuju ovisno o izvoru iz kojeg su preuzeti. Povećanje kuta otklona je pozitivna promjena kuta otklona na određenoj duljini kanala (npr. 2 do 6°/30 m).

Horizontalne bušotine velikog polumjera zakrivljenosti karakterizira povećanje kuta otklona od 2 do 6°/30 m (2 do 6°/100 ft), te polumjer zakrivljenosti od 300 do 900 m (1000 do 3000 ft). Ovaj dio kanala izrađuje se konvencionalnim alatima za koso usmjereno bušenje, a duljina horizontalnog dijela kanala iznosi i do 2 350 m (8 000 ft). Upotreba rotirajućih upravljivih sustava može biti potrebna za bušenje izrazito duge horizontalne sekcije jer bušenje s upravljivim motorom u kliznom načinu rada nije moguće (PetroWiki, 2016a).

Horizontalne bušotine srednjeg polumjera zakrivljenosti imaju povećanje kuta otklona od 6° do 35°/30 m (6 do 35°/100 ft), a polumjer zakrivljenosti od 50 m do 300 m (160 do 1000 ft). Ove bušotine se izrađuju uz primjenu specijalnih dubinskih uronjenih motora (*engl. mud motors*) i konvencionalnog sastava bušaćeg alata. Horizontalna sekcija se često buši uz primjenu konvencionalnog sklopa upravljivih dubinskih motora. U praksi,

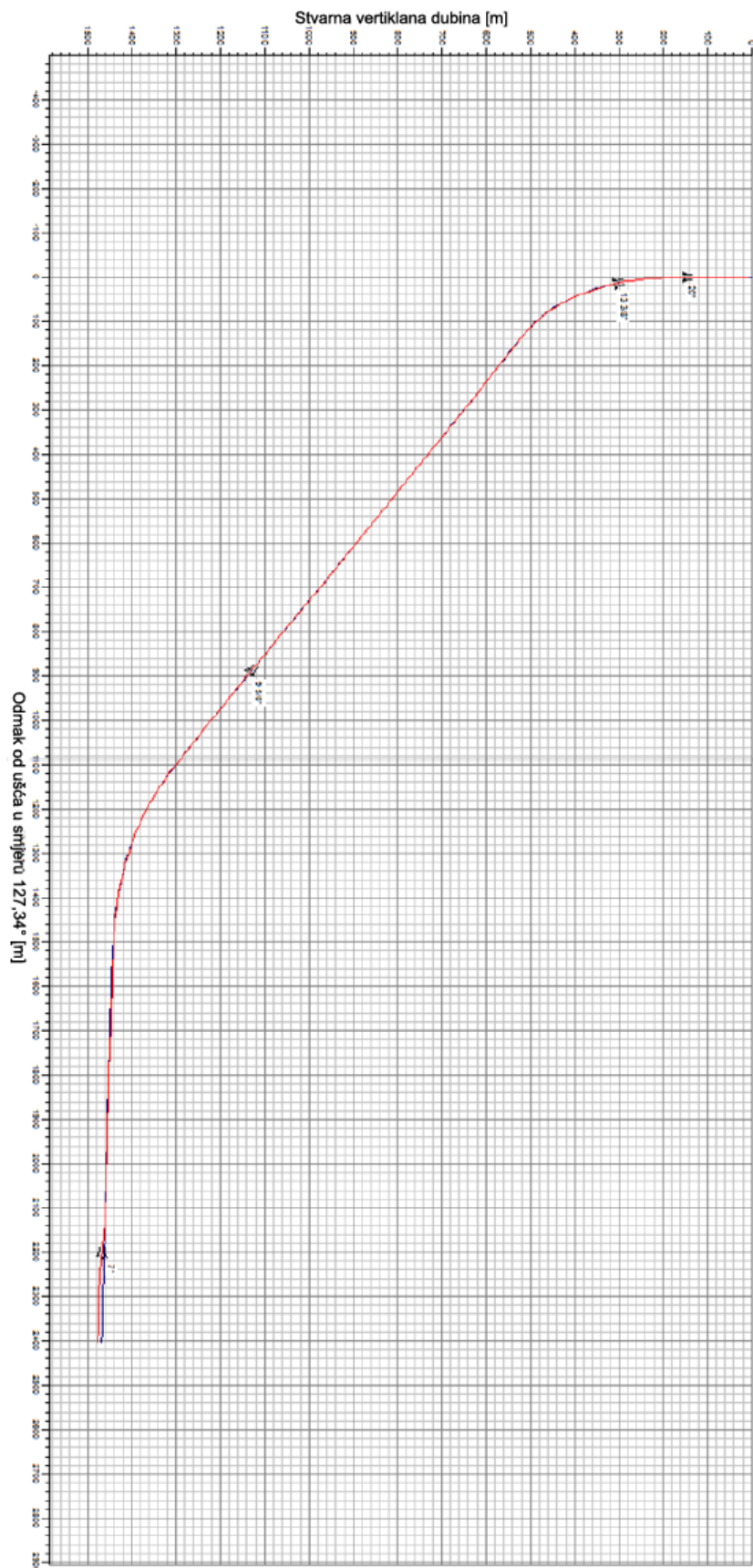
takav tip bušotina klasificira se kao bušotie sa srednjim polumjerom zakrivljenosti ako dubinski bušači sklop (*engl. bottom hole assembly - BHA*) ne može rotirati cijelo vrijeme kroz sekciju gdje dolazi do povećanja kuta (PetroWiki, 2016a).

Kod horizontalne bušotine malog polumjera zakrivljenosti povećanje kuta otklona iznosi od 5° do $10^{\circ}/\text{m}$ (5 do $10^{\circ}/3\text{ ft}$) što omogućava polumjer zakrivljenosti od 6 do 12 m (20 do 40 ft). Duljina horizontalne sekcije varira između 60 i 275 m (200 do 900 ft). Bušotine malog polumjera zakrivljenosti buše se uz primjenu posebnih bušačkih alatki i tehnika. Ovaj profil kanala najčešće se izvodi kao „re-entry“, iz postojećeg kanala bušotine (PetroWiki, 2016a).

Za primjer horizontalnog bušenja razmatrana je razradna bušotina IKA A-4 HOR, koja je projektirana kao interpolacijska bušotina na plinskom polju Ika, antiklinali IKA A. Plinsko polje Ika nalazi se unutar granica eksploatacijskog polja „Sjeverni Jadran“, oko 50 km jugozapadno od Pule i oko 30 km jugoistočno od plinskog polja Ivana.

Zadatak bušotine je raskrivanje pleistocenskih turbiditnih slabo vezanih pješčenjaka formacije Susak u plitkom, kosom dijelu kanala bušotine i privođenje eksploataciji plina iz ležišta, te djelomično raskrivanje i privođenje eksploataciji plina iz glavnog ležišta (Karbonati formacije Dinaridi), mezozojske starosti, horizontalnim kanalom bušotine.

Razradna bušotina IKA A-4 HOR izgrađena je kao dodatna bušotina na eksploatacijskoj platformi IKA A bušenjem iz postojeće rezervne strukturne (konduktor) kolone promjera 508 mm ($20''$). Putanja bušotine ulazi u ležište „karbonati“ gotovo horizontalno (inklinacija na ulasku od $88,3^{\circ}$) u smjeru pružanja $127,34^{\circ}$. Putanja bušotine IKA A-4 HOR prikazana je na slici 2-12.



Slika 2-12. Trajektorija bušotine Ika A4 HOR (Drilling & completion final report for development well Ika A-4 HOR, 2014)

Strukturna (konduktor) kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 508,0 mm (20")

Strukturna kolona zaštitnih cijevi ugrađena je mehaničkim čekićem u fazi instaliranja eksploatacijske platforme zabijanjem do 50 m okomito u morsko dno. Peta strukturne kolone nalazi se na dubini od 149 m od vrtaćeg stola.

Uvodna kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8")

Dubina ugradnje uvodne kolone zaštitnih cijevi je 305 m, a izbušena je alatom za usmjeravanje uz korištenje divertera. Njome su prekrivene nekonsolidirane površinske formacije (do frakturnog gradijenta od 1,48 bar/10 m). Sastav alata za izradu ove dionice kanala bušotine bio je slijedeći:

- žrvanjsko dlijeto IADC koda 115 promjera 406,40 mm (16");
- dubinski motor promjera 244,60 mm,
- kratka nemagnetska teška šipka promjera 203,20 mm;
- telemetrijski uređaj promjera 406,40 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 203,20 mm;
- gibljivi prijelaz promjera 406,40 mm;
- udarač promjera 203,20 mm;
- prijelaz promjera 203,20 mm;
- teške bušaće šipke promjera 127,00 mm.

Tehnička kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8")

Bušenje za tehničku kolonu zaštitnih cijevi obavljeno je dlijetom promjera 311 mm (12 1/4") i sklopom alatki za usmjereno bušenje. Dubina ugradnje kolone je 1531 m mjerene dubine (oko 1127 m stvarne vertikalne dubine). Njome se omogućilo prekrivanje nekonsolidiranih površinskih formacija do iznad najplićeg ležišta (odnosno frakturnog gradijenta: 1,62 - 1,63 bar/10m). U nastavku je osigurano pouzdano raskrivanje ležišta, te sigurna izrada bušotine u fazi bušenja promjerom dlijeta 215,9 mm (8 1/2").

Alat za izradu kanala bušotine 311,2 mm (12 1/4"):

- PDC dlijeto IADC koda M323 promjera 311,20 mm (12 1/4");
- stabilizator neposredno iznad slijeta promjera 285,75 mm;
- dubinski motor promjera 244,60 mm;

- protočna spojnica promjera 203,20 mm;
- nemagnetska stabilizator promjera 203,20 mm;
- kratka nemagnetska teška šipka promjera 203,20 mm;
- telemetrijski uređaj promjera 206,50 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 203,20 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 203,20 mm;
- protočna spojnica promjera 203,20 mm;
- gibljivi prijelaz promjera 203,20 mm;
- udarač promjera 203,20 mm;
- prijelaz promjera 203,20 mm;
- teške bušaće šipke promjera 127,00 mm.

Eksploatacijska kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 177,8 mm (7"):

Bušenje za ugradnju eksploatacijske kolone zaštitnih cijevi obavljeno je dlijetom promjera 215,9 mm (8 ½") do dubine od 2946 m mjerene odnosno približno 1460 m vertikalne dubine. Bušenje se izvodilo alatom za usmjereno bušenje. Neposredno prije ugradnje eksploatacijske kolone zaštitnih cijevi, prema geološkom operativnom programum obavljena su elektrokarotazna mjerenja na električnom kabelu, nakon kojih je uslijedilo pročišćavanje kanala bušotine krutim rotacijskim alatom i dlijetom promjera 215,9 mm (8 ½") te konačno ugradnja eksploatacijske kolone zaštitnih cijevi.

Alat za izradu kanala bušotine 215,9 mm (8 ½"):

- PDC dlijeto IADC koda M-323, promjera 215,9 mm (8 ½");
- RSS rotirajući upravljivi sustav promjera 171,45 mm;
- sklop za karotažu u procesu bušenja promjera 171,45 mm;
- telemetrijski uređaj promjera 171,45 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 171,45 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 181,10 mm;
- protočna spojnica promjera 171,45 mm;
- udarač promjera 168,40 mm;
- teške bušaće šipke promjera 127,00 mm.

Otvoreni kanal bušotine promjera 155,6 mm (6 1/8")

Nakon cementacije i ispitivanja nepropusnosti eksploatacijske kolone, bušilo se alatom za usmjereno bušenje s dlijetom promjera 155,6 mm (6 1/8") u duljini od 200 m mjerene dubine pod kutom odklona od 89,14° kroz ležište „karbonati“.

Alat za izradu kanala bušotine promjera 155,6 mm (6 1/8"):

- PDC dlijeto IADC kod M-323 promjera 155,6 mm (6 1/8");
- rotirajući upravljivi sustav promjera 120,7 mm;
- sklop za karotažu u procesu bušenja promjera 120,7 mm;
- telemetrijski uređaj promjera 120,7 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 171,45 mm;
- nemagnetska teška šipka promjera 114,3 mm;
- protočna spojnica promjera 120,7 mm;
- udarač promjera 120,7 mm;
- teške bušaće šipke promjera 88,9 mm.

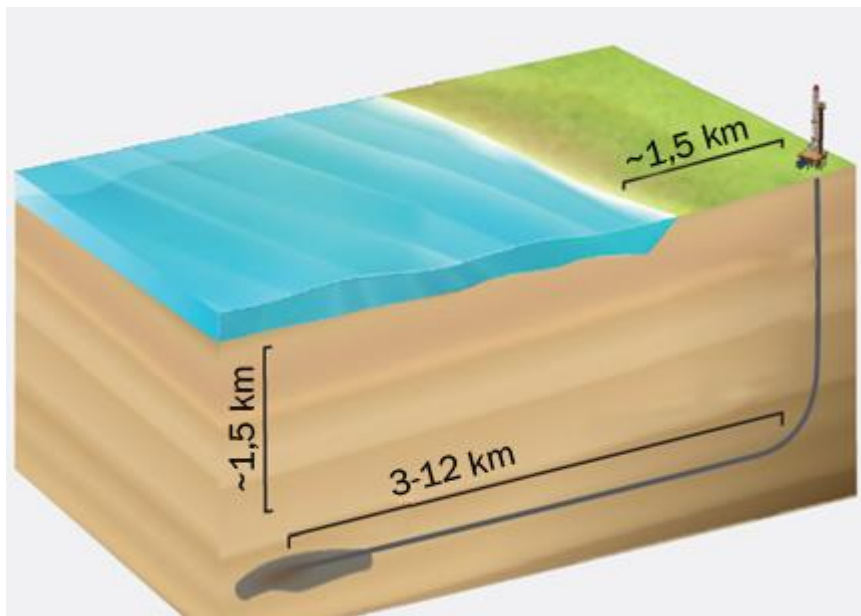
Nakon završetka bušotine, horizontalni dio otvorenog kanala se urušio te je odlučeno izraditi novi kanal (*engl. sidetrack*) koji je 1,4 m ispod planirane putanje, ali s planiranom i postignutom mjerenom duljinom kanala bušotine od 3150 m.

2.3.2. Bušotine velikog dosega

Bušotina velikog dosega (*engl. extended reach well - ERW*) je svaka bušotina čiji je omjer mjerene duljine kanala (*engl. measured depth - MD*) i stvarne vertikalne dubine kanala (*engl. true vertical depth - TVD*) veći od 2 (PetroWiki, 2016b). Izrada ovakvih bušotina našla je veliku primjenu u cilju omogućavanja ekonomičnog pristupa određenim rezervama, omogućava pristup rezervama koje su prethodno bile izvan dosega i smanjuje utjecaj procesa bušenja i proizvodnih postrojenja na okoliš (Walker, 2012). Tvrtka ExxonMobile ima impresivan rekord za opremanje takvih bušotina (26 od 30 najdužih bušotina velikog dosega) te je lider u bušotinama velikog dosega s puno vlastitih patenata.

Trenutni rekord u duljini horizontalnog dosega postignut je u bušotini O-14 na polju Chayvo s iznosom od 12033 m duljinom horizontalnog dijela kanala bušotine, dok je mjerena duljinom kanala bušotine 13500 m (Roseneft, 2015). Utjecaj na morski život i okoliš može biti u potpunosti eliminiran u slučaju da je bušotina izbušena s lokacije na

kopnu, kako bi se dosegla nafta i plin duboko ispod oceana (slika 2-13) (ExxonMobil 2015).



Slika 2-13. Bušotina velikog dosega (<http://3.bp.blogspot.com/>)

Horizontalne bušotine velikog dosega je poželjno izraditi u slučaju postajanja ležišta ispod naselja ili ležišta koja nije moguće doseći vertikalnim ili koso usmjerenim bušotinama, npr. izrada bušotina s kopna umjesto korištenja platformi radi financijske uštede. Većina horizontalnih bušotina izrađuju se zbog razrade raspucanih stijena u ležištu, ležišta s potencijalnim problemima konusiranja vode i/ili plina te ležišta s proizvodnim naslagama male debljine.

2.4. Izrada bočnog kanala iz postojećeg kanala bušotine (*engl. re-entry*)

Re-entry bušotine predstavljaju izradu bočnog kanala iz postojeće neproduktivne ili slaboproduktivne bušotine. Na projektiranoj dubini postavlja se cementni most (duljine najmanje 100 metara) za postavljanje klina za usmjeravanje bušenja i glodanjem se izreže otvor u zaštitnoj cijevi. Primjer za skretanje kanala iz postojeće bušotine je izrada bočnog kanala glodanjem otvora kroz dvije ugrađene zaštitne cijevi na plinsko kondenzatnom polju Kalinovac.

Bušotina Kalinovac-10, nakon puštanja u proizvodnju 1988. godine, počela je u određenom trenutku uz pad tlaka na ušću i smanjene količine plina, proizvoditi i slojnu vodu. Odlučeno je da se iz postojećeg vertikalnog kanala izvede usmjereni kanal manjeg promjera Kalinovac-10R u plići dio strukture polja Kalinovac. Prema projektnom zadatku proizvodit će se iz otvorenog kanala bušotine (*engl. open hole*) duljine od 35 do 40 m.

Zadatak bušotine Kal-10 R bio je sljedeći:

- nabušiti ležište Kalinovac na povoljnijem strukturnom položaju u dobrom kolektorskom razvoju;
- potvrditi strukturno-tektonsko rješenje;
- omogućiti proizvodnju plina bez slojne vode.

Tijekom izrade kanala bušotine Kal-10R bilo je potrebno:

- likvidirati vertikalni kanal bušotine Kalinovac-10;
- usmjeravanje izvesti prema zadanim elementima;
- kanal bušotine izrađivati pod optimalnim uvjetima, kako ne bi došlo do oštećenja ležišta;
- lajner promjera 0,1143 m (4 1/2") ugraditi u pokrovnu stijenu ležišta Kalinovac, dobro ga zacementirati, a zatim manjim promjerom dlijeta otvoriti približno 35 do 40 m ležišta Kalinovac .

Postavljeni su sljedeći elementi usmjeravanja za kanal bušotine Kal-10R:

- krovina ležišta Kalinovac (vapnenci) $H_v = 3390$ m
- azimut $A_z = 230^\circ$
- devijacija $L_{krovina} = 300$ m

Prije same izrade bilo je potrebno napraviti određene pripreme u bušotini. Bušotinu je trebalo ugušiti, a to je učinjeno primjenom viskoznog gela. Nakon utiskivanja gela bušotina je ugušena, a odmah nakon toga perforiran je tubing neposredno iznad kliznih vrata za cirkulaciju. Potom je izvršena zamjena inhibiranog ulja sa slojnom vodom.

Montažom preventera te njegovim ispitivanjem na tlak od 350 bara, stečeni su uvjeti za sigurno vađenje proizvodnog tubinga s opremom.

Nakon što je proizvodna oprema izvađena pristupilo se pripremnim radnjama za glodanje kolone zaštitnih cijevi do 3384 m te se je provelo karotažno mjerenje intervala od 2700 do 3010 m. Spuštena je mehanička pregrada proizvođača "Baker" na dubinu od 3365,21 m, iznad koje je postavljen cementni most od 3365,21 m do 3255 m (zatvaranje proizvodnog intervala), a cementni most kao oslonac za klin postavljen je u intervalu od 2820 do 2936 m.

Cementni most poravnat je na dubini od 2864,6 m i ispitan s opterećenjem od 15 t tijekom 15 min uz cirkulaciju. Ponovno je glodana kolona do vrha cementa i izvršena je zamjena slojne vode isplakom gustoće 1300 kg/m^3 . Spušten je klin, orijentiran žiroskopom i ostavljen na dubini 2863,89 m, što znači da se vrh klina nalazio na 2859,34 m (duljina klina iznosi 4,55 m).

Otvaranje prozora tj. bočnog otvora bilo je potrebno ostvariti kroz dvije kolone zaštitnih cijevi prvu promjera 0,1778 m (7") jedinične mase 47,6 kg/m i kvalitete čelika L-80 i druge 0,2448 (9 5/8") jedinične mase 70,64 kg/m i kvalitete čelika C-95.

Alat koji se pritom koristio za otvaranje bočnog otvora:

- **Stalni klin** - jednostavne je konstrukcije i služi za zasijecanje novog kanala bušotine te omogućuje orijentaciju i usmjeravanje bušačkih alatki, odnosno kanala bušotine u željenom smjeru.
- **Glodači** - alatke koje se koriste pri zasijecanju i otvaranju bočnog otvora na koloni zaštitnih cijevi.
- **Magnet** - služi za prikupljanje strugotina metala nastalih otvaranjem bočnog otvora, a postavljaju se u kotlić vibracijskog sita.

Za postupak otvaranja prozora korišteno je 5 različitih sastava alata (INA-Naftaplin, 2000).

I. sastav alata

1. stalni klin;
2. početni glodač promjera 0,14923 m (5 7/8");
3. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") REG_z x (3 1/2") IF_z ;
4. teška bušaća šipka promjera 0,0889 m (3 1/2") IF;
5. prijelaz za orijentiranje;
6. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") IF_M x NC-35_z ;
7. teška šipka promjera 0,12065 m (4 3/4") (12 komada);

8. prijelaz NC-35_z x (3 1/2") IF_z ;
9. teške bušaće šipke (3 komada);
10. niz bušaćih šipki promjera 0,0889 m (3 1/2") IF.

Niz alata je ugrađen do dubine cementnog mosta na 2863,90 m i izvršena je orijentacija klina žiroskopom. Nakon orijentiranja klina nasjedom od 1 do 2 t opterećenja aktiviraju se čeljusti klina u koloni zaštitnih cijevi čime je klin trajno postavljen u koloni. Dodatnim opterećenjem od 6 do 8 t dolazi do kidanja svornjaka čime se oslobađa početni glodač od klina. Slijedi početak glodanja odnosno otvaranje bočnog otvora na koloni zaštitnih cijevi početnim glodačem.

Ovaj sastav alata imao je za cilj ugradnju, orijentiranje i postavljanje klina u kolonu zaštitnih cijevi, te početno zasijecanje novog kanala bušotine u koloni. Postignuta dubina bila je 2859,94 m.

II. sastav alata:

1. čeonu glodač promjera 0,14923 m (5 7/8");
2. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") REG_z x (3 1/2") IF_z ;
3. teška bušaća šipka promjera 0,0889 m (3 1/2") IF;
4. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") IF_M x NC-35_z ;
5. teška šipka promjera 0,12065 m (4 3/4") (12 komada);
6. prijelaz NC-35_z x (3 1/2") IF_z ;
7. teške bušaće šipke (3 komada);
8. niz bušaćih šipki promjera 0,0889 m (3 1/2") IF.

Ovim sastavom alata nastavlja se s otvaranjem bočnog otvora u koloni zaštitnih cijevi nazivnog promjera 0,1778 m (7") i početno otvaranje u koloni zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8"). Postignuta dubina je 2861,48 m.

III. Sastav alata identičan je kao i drugi, a njime se namjeravalo postići konačno otvaranje bočnog otvora kroz dva niza zaštitnih cijevi. Postignuta dubina je 2862,98 m. Ovim alatom izašlo se iz kolone zaštitnih cijevi. Nakon 13 sati rada alat je izvađen i zamijenjen s polukrutim sastavom alata.

IV. sastav alata:

1. čeonu glodač promjera 0,14923 m (5 7/8");
2. glodač „lubunica“ promjera 0,14923 (5 7/8");

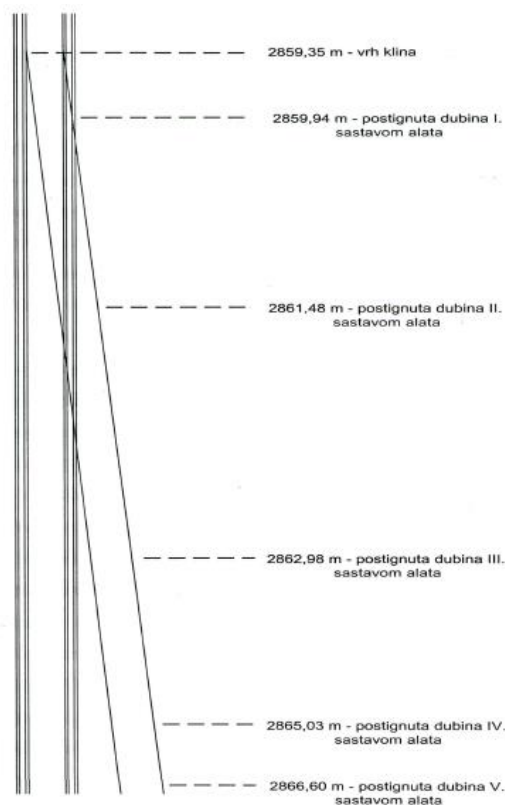
3. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") REG_z x (3 1/2") IF_z ;
4. teška bušaća šipka promjera 0,0889 m (3 1/2") IF;
5. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") IF_M x NC-35_z;
6. teška šipka promjera 0,12065 m (4 3/4") (12 komada);
7. prijelaz NC-35_z x (3 1/2") IF_z ;
8. teške bušaće šipke (3 komada);
9. niz bušaćih šipki promjera 0,0889 m (3 1/2") IF.

Ovim sastavom alata bilo je potrebno zasjeći novi kanal bušotine u formaciji i obraditi bočni otvor kroz dva niza zaštitnih cijevi. Postignuta je dubina 2865,03 m te je zasječen novi kanal bušotine u formaciju u duljini od 2,05 m.

V. sastav alata:

1. čeoni glodač promjera 0,14923 m (5 7/8");
2. glodač „lubenica“ promjera 0,14923 (5 7/8");
3. glodač „lubenica“ promjera 0,14923 (5 7/8");
4. prijelaz promjera 0,0889 m (3 1/2") REG_z x NC-35_z ;
5. teška bušaća šipka promjera 0,12065 m (4 3/4") (12 komada);
6. prijelaz NC-35_z x (3 1/2") IF_z ;
7. teške bušaće šipke promjera 0,0889 m (3 1/2") (3 komada);
8. niz bušaćih šipki promjera 0,0889 m (3 1/2") IF.

Nakon konačnog otvaranja bočnog otvora kroz dva niza zaštitnih cijevi i ulaska u formaciju zabušeno je još 1,75 m i izvršena je kompletna obrada zaštitnih cijevi s dva glodača, tzv. „lubenica“. U ovoj fazi postignuta konačna dubina bušotine iznosila je 2866,60 m (slika 2-14).

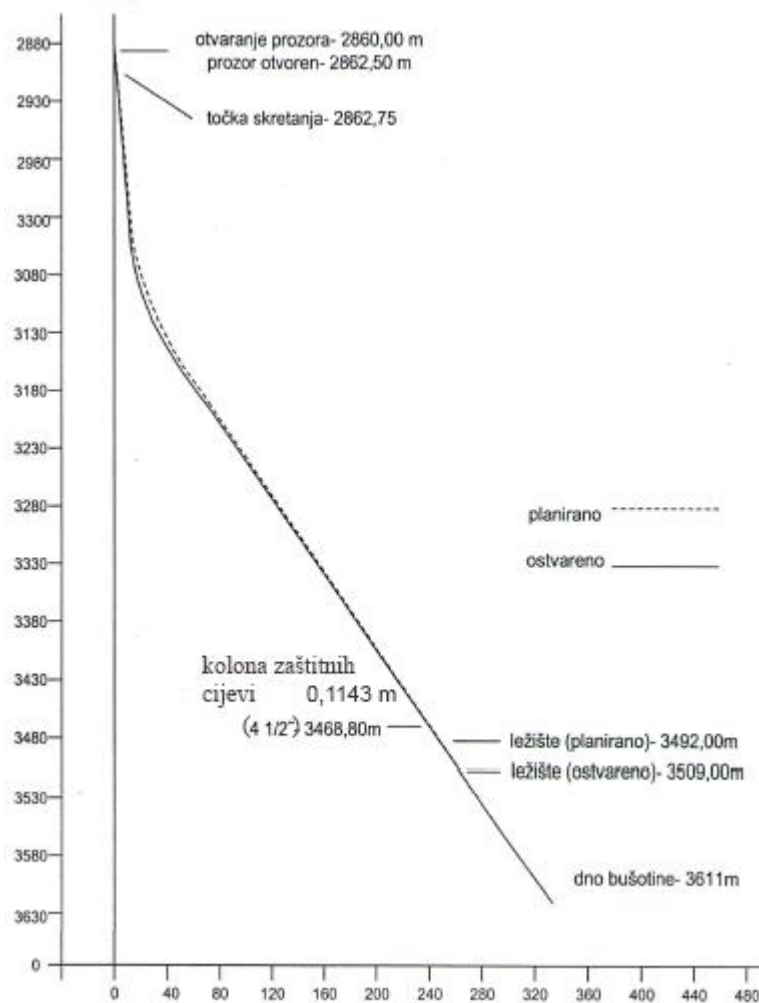


Slika 2-14. Postignute dubine pojedinim sastavom alata pri otvaranju prozora kroz dvije kolone zaštitnih cijevi (Završni izvještaj za bušotinu Kalinovac 10-R, 2000)

Bušenje dlijetom promjera 0,149223 m (5 7/8") izbušen je interval od 2866 do 2931 m radi smanjena utjecaja metala (kolone) na točnost mjerenja tijekom bušenja. Na dubini 2928 m izmjeren je kut otklona $3^{\circ} 30'$ i azimut $A_z=270^{\circ}$.

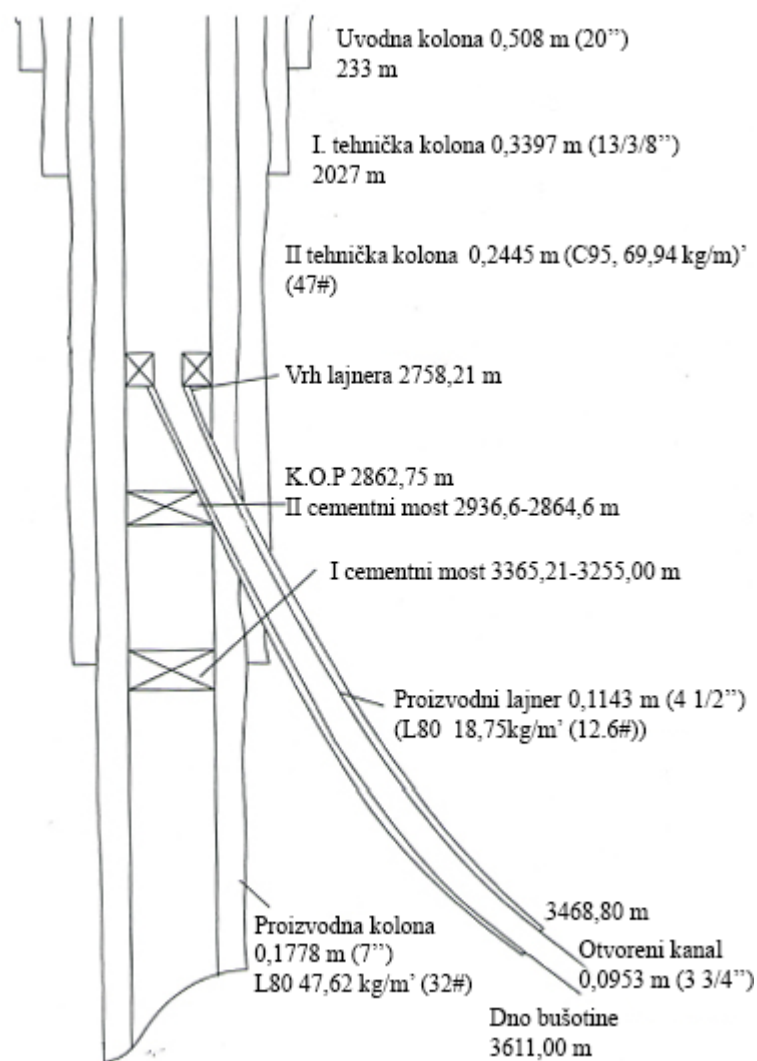
Bušenje je nastavljeno dubinskim motorom (kosi prijelaz $1^{\circ}15'$) i MWD opremom te se nastavilo bušenje klizanjem (*engl. sliding mode*) do 2974 m. Na dubini od 3189 m došlo je do dotoka plina i prelijevanja isplake iz kanala bušotine, pa je bušotina ugušena otežavanjem isplake, uz izgaranje plina na baklji. Lajner promjera 0,1143 m (4 1/2") (18,75kg/m'; L-80) spušten je na bušaćim šipkama promjera 0,0889 m (3 1/2")

Nakon bušenja cementnog čepa i cementacijske pete, izbušen je i otvoreni kanal bušotine (od 3469 do 3611 m) dlijetom promjera 0,095253 m (3 3/4") na kombiniranom nizu bušaćih šipki promjera 0,060325 m (2 3/8") i 0,0889 m (3 1/2"). Na dubini od 3509 m ušlo se u ležište. Bušenje je prekinuto te je bušotina pripremljena za završno elektrokarotžno mjerenje. Na slici 2-15 prikazana je putanja bušotine Kalinovac 10-R.



Slika 2-15. Planirana i ostvarena putanja bušotine Kal-10R (Završni izvještaj za bušotinu Kalinovac 10-R, 2000)

Dubina točke skretanja (*engl. Kick-Off Point - KOP*) je na 2862,75m. Bušotinom su probušene sve projektom predviđene naslage, a očekivano ležište Kalinovac (miocen-marinski razvoj) nabušeno je na dubini 3509 m ($H_v=3405,83$ m, $A_z=227,7^\circ$, $L=312,97$ m, $Kr=38,4^\circ$) što je za oko 16 m dublje od dubine ležišta predviđene projektom. Bušotina kao takva ispunila je projektom postavljeni zadatak te je i opremljena za proizvodnju. Tehnički podaci o bušotini prikazani su na slici 2-16.



Slika 2-16. Konstrukcija bušotine Kal-10R (Završni izvještaj za bušotinu Kalinovac 10-R, 2000)

2.5. Izrada rasteretne bušotine (*engl. relief well*)

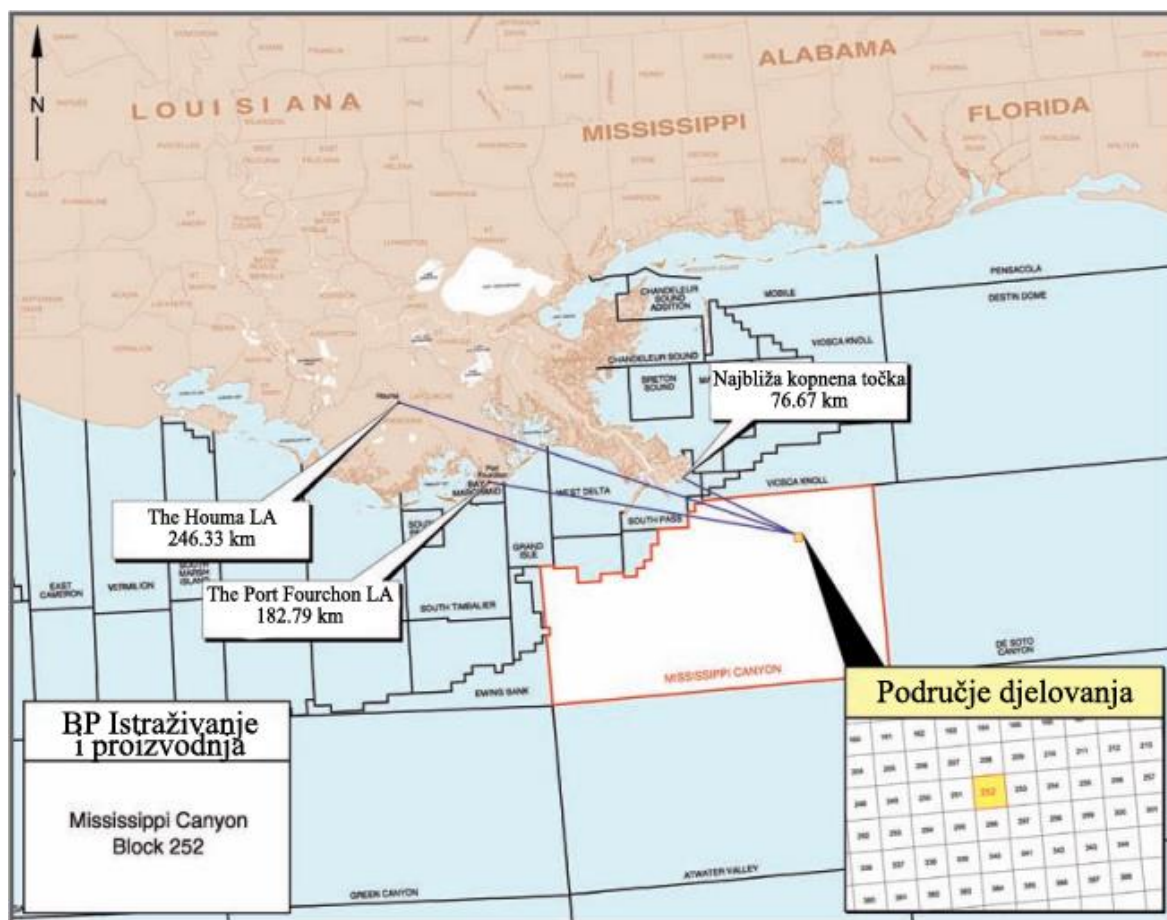
Najpoznatiji primjer rasteretne bušotine svakako je nedavni slučaj saniranja jedne od najvećih havarija u povijesti odobalnog bušenja, u Meksičkom zaljevu na bušotini Macondo 252 (u daljenjem tekstu MC 252). Najveća havarija u povijesti naftne industrije dogodila se 20. travnja 2010. godine (slika 2-17). Tog kobnog dana, zbog ljudskih pogrešaka i neispravnosti opreme, došlo je do nekontrolirane erupcije nafte i plina iz duboke istražne bušotine MC 252 u Meksičkom zaljevu. Posljedica erupcije bilo je zapaljenje bušaće platforme Deepwater Horizon te niz eksplozija koje su rezultirale uništenjem jedne od najsuvremenijih platformi (vrijedne oko 3 milijarde kuna), izgubljeno je 11 života te je došlo do istjecanja oko 3 milijuna litara nafte dnevno. Procjenjuje se da je u razdoblju od 20. travnja do 14. rujna u more isteklo oko 740 000 m³ nafte. Ako se tome dodaju vrijednost same platforme te izravni i neizravni troškovi sanacije erupcije nafte i plina i trajnog napuštanja bušotine, ukupni troškovi premašuju 50 milijardi američkih dolara. Ironično je u cijeloj priči da je 22. travnja, Dan Planeta Zemlje (BP, 2010).



Slika 2-17. Platforma Deepwater Horizon u plamenu (New York Times, 2010)

Incident koji se dogodio bio je takvog intenziteta da je bilo potrebno skoro pet mjeseci da se bušotina uguši. Od tih pet mjeseci, puna tri mjeseca ugljikovodici su nesmetano istjecali iz bušotine u Meksički zaljev (slika 2-18). Naime, 15. srpn

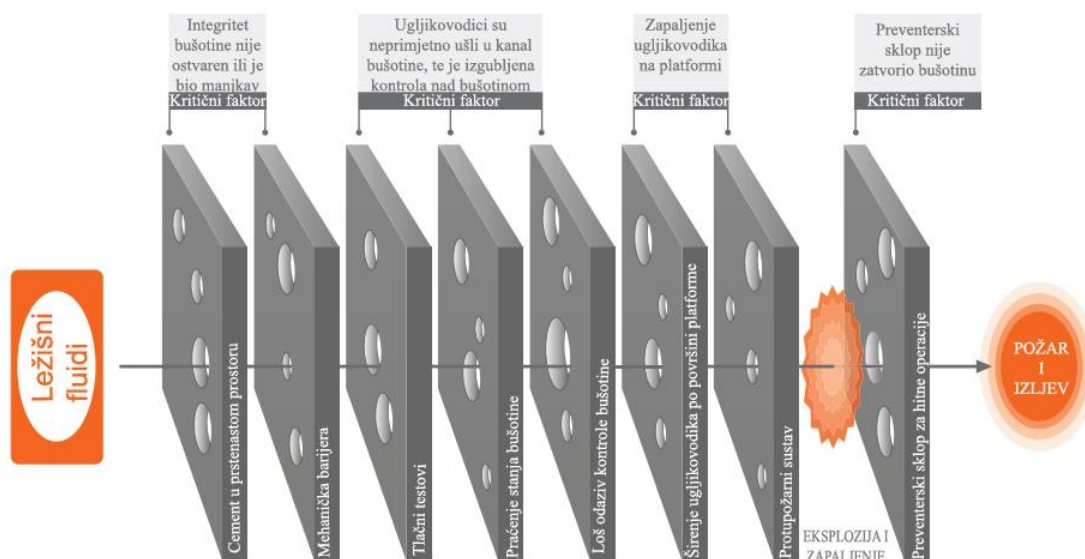
ja 2010. godine, istjecanje ugljikovodika iz bušotine je uspješno stavljeno pod kontrolu, ali je trebalo pričekati do 19. rujna 2010. godine da se završi rasteretna bušotina putem koje se ugušila i zacementirala bušotina MC 252.



Slika 2-18. Pozicija bušaće platforme "Deepwater Horizon" dana 20. travnja 2010 (BP, 2010)

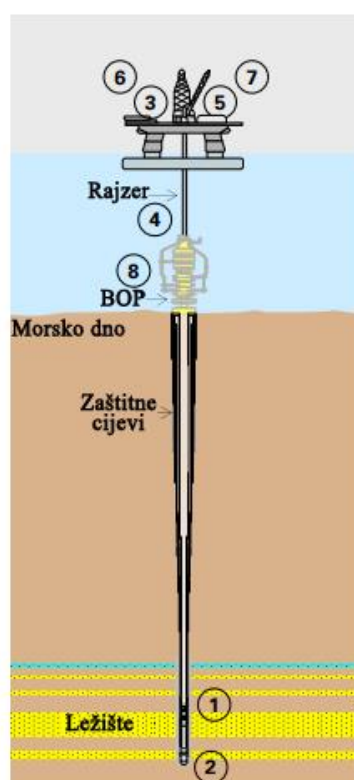
Odmah nakon nesreće, osnovana su mnoga povjerenstva i komisije koje su imale zadaću rekonstruirati događaje, pronaći uzroke i sagledati posljedice nesreće te identificirati krivce. Najpoznatija i najutjecajnija komisija je osnovana od strane Vlade SAD-a.

Tvrtka BP objavila je izvještaj 8. rujna 2010. godine pod naslovom „Izvještaj o istraživanju Deepwater Horizon incidenta“. Izvještaj sadrži analizu događaja koji su doveli do incidenta, četiri faktora rizika (slika 2-19), te osam ključnih nalaza povezanih s nizom uzroka događaja (slika 2-20).



Slika 2-19. Prikaz četiri kritična faktora (BP, 2010)

8 KLJUČNIH NALAZA



Integritet bušotine nije ostvaren

1. Cementna barijera prstenastog prostora nije spriječila dotok ugljikovodika
2. Barijera kućišta pete kolone nije izolirala prodor ugljikovodika

Gubitak kontrole nad bušotinom zbog neometanog ulaska ugljikovodika u kanal bušotine

3. Negativni tlačni test je prihvaćen, iako hermetičnost bušotine nije ostvarena
4. Dotok ugljikovodika nije primijećen sve dok nisu zapunili rajzer
5. Primjenom pogrešnih zahvata kontrole bušotine nije ponovno uspostavljena kontrola nad bušotinom

Zapaljenje ugljikovodika na platformi

6. Usmeravanjem isplake pomiješane s ugljikovodicima u separator za izdvajanje plina, plin se izdvojio i proširio po bušačem postrojenju
7. Protupožarni i sigurnosni sustavi nisu spriječili zapaljenje ugljikovodika

Preventerski sklop nije brtvio bušotinu

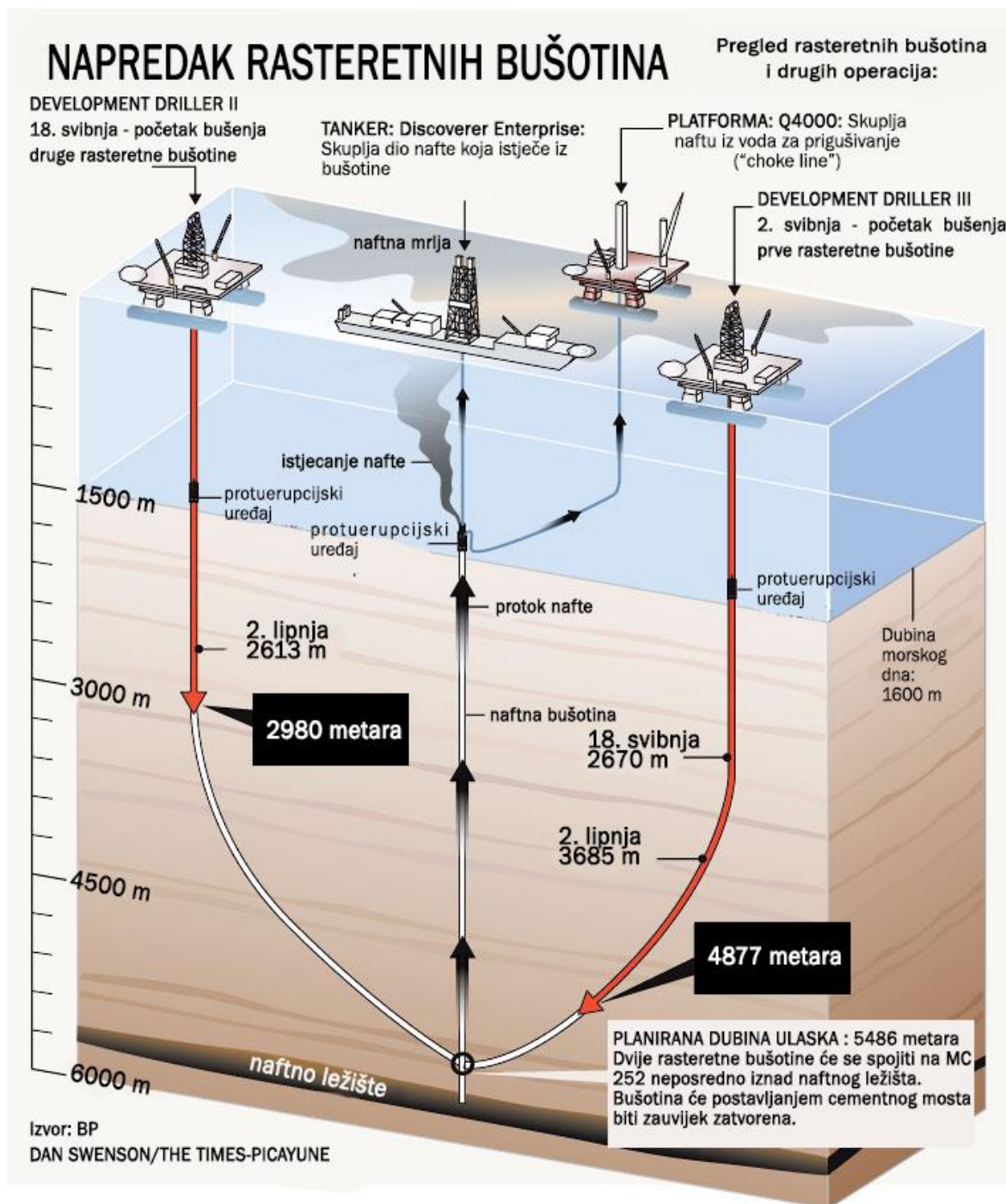
8. Sigurnosni preventerski sklop nije zatvorio bušotinu

Slika 2-20. Osm ključnih nalaza i lokacije probijenih barijera (BP, 2010)

Prije konačnog stavljanja bušotine pod kontrolu pokušani su mnogi načini ublažavanja posljedica izljeva te saniranja stanja. Nijedan od tih pokušaja nije stavio

bušotinu pod kontrolu zbog niza tehničkih i tehnoloških problema. Pokušavalo se zaustaviti istjecanje daljinskim podmorskim ronilicama (*engl. Remotely Operated Vehicles-ROV*), pokušano je direktno spajanje na oštećene rajzerske cijevi; rezanje rajzera i njegovo uklanjanje s dna mora, prekrivanje kupolama različitih veličina s poveznim cjevovodima do površine, utiskivanje otežane isplake kroz ušće te konačno rješenje, izrada rasteretne bušotine. Dubina mora i velike količine ugljikovodika pod visokim tlakom bili su jedan od glavnih uzroka dugotrajnosti zatvaranja i gušenja bušotine. Drugi razlog bila je neispravnost opreme preventerskog sklopa koja nije pravilno radila niti prije incidenta, a bila je glavna nada za zatvaranje bušotine (BP, 2010).

Konačno gušenje bušotine planirano je bušenjem usporednog kanala koji se trebao spojiti s kanalom bušotine MC 252. Planirane su dvije rasteretne bušotine u slučaju da se jednom ne uspije ući u bušotinu MC 252. Njihova izrada započela je nedugo nakon nesreće. Poluuronjiva platforma Development Driller III tvrtke Transocean počela je bušiti prvu rasteretnu bušotinu 2. svibnja 2010. godine. Platforma GSF Development Driller II počela je bušiti drugu rasteretnu bušotinu 18. svibnja 2010. Kanal prve rasteretne bušotine je ušao u kanal bušotine MC 252 16. rujna. Dan poslije započelo se s operacijom konačnog gušenja i postavljanja cementnih čepova. Nakon dodatna dva dana izvođenja tlačnih testova Vlada SAD-a proglasila je 19. rujna 2010. godine bušotinu MC 252 potpuno ugušenom i zabrtvljenom (slika 2-21).



Slika 2-21. Napredak rasteretnih bušotina (White, 2010)

2.6. Vraćanje bušotine u željeni pravac

Pri izradi bušotina gotovo uvijek dolazi do neželjenog skretanja kanala bušotine od projektirane putanje. Otklon kanala bušotine od zadane putanje može imati brojne negativne posljedice, kao što su pogrešna tumačenja geoloških podataka, nedosezanje prethodno ispitanih slojeva s potencijalnim zalihama fluida, a veće iskrivljenje kanala može potpuno onemogućiti daljnju izradu bušotine i njen završetak.

Uzroci iskrivljenja kanala bušotine mogu se obuhvatiti trima skupinama:

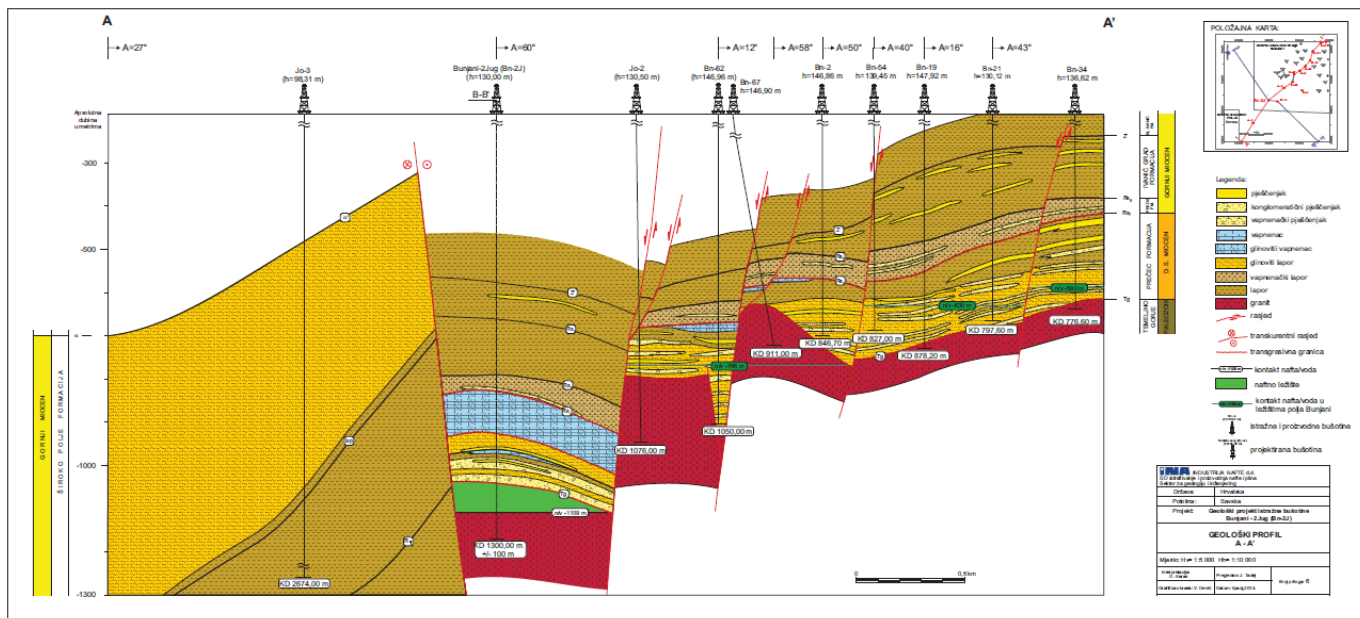
- geološki
 - iskrivljenje kanala bušotine najčešće dolazi prilikom prolaska dlijeta iz tvrdih u meke stijene i obratno. Vjerojatno je najutjecajniji faktor kut pod kojim kanal bušotine presijeca slojeve;
- tehnički
 - neispravno centriranje tornja, iskrivljenje bušačih i teških šipki, ekscentričnost lopatastih dlijeta (ranije u primjeni) te iskrivljenje radne šipke samo su neki od tehničkih uzroka;
- tehnološki
 - uglavnom ovise od izboru i sastavu alata te o režimu bušenja.

Dvije mjere sprječavanja otklona kanala bušotine su tehnika njihala i tehnika krute stabilizacije.

Primjer vraćanja bušotine u željeni pravac opisan je u primjeru iz domaće prakse, na vertikalnoj bušotini Bunjani-2 Jug (Bn-2J). Zadatak bušotine Bn-2J je utvrditi prostiranje ležišta nafte u Temeljnog gorju, utvrditi njegove petrofizikalne i proizvodne karakteristike te potvrditi procijenjene rezerve. Bušotina Bn-2J locirana je 312 m Sjeverozapadno od bušotine Bunjani-1 Jug, odnosno 498 m jugozapadno od bušotine Johovac-2.

U širim regionalnim geotektonskim okvirima, područje naftnog polja Bunjani i bušotina Bn-1J pripada bloku „Moslavina“ - sjeveroistočnom rubnom dijelu Savske depresije s utvrđenim nizom naftno-plinskih polja: Kloštar, Šumenčani, Bunjani te Mramor Brdo dalje prema jugoistoku.

Na slici geološkog projekta istražne bušotine Bn-2J, vidljivo je da se na dubini od oko 900 m slojevi vapnenca ne pružaju okomito na trajektoriju bušotine, već pod određenim kutom. Upravo radi toga će doći do odstupanja od vertikalnosti bušotine.



Slika 2-22. Geološki projekt istražne bušotine Bunjani-2J, geološki profil B-B' (INA-Naftaplin, 2015)

Nakon bušenja dlijetom promjera 215,9 mm (8 1/2") do dubine 978 m uslijedilo je mjerenje inklinacije spuštanjem inklinometra na žici. Pri mjerenju kuta odklona bušotine izmjerena je kut od 5,25° pa se je bušenje nastavilo „blažim“ režimom, primjenom sastava krutog alata tehnikom njihala (*engl. pendulum*). U slijedećim mjerenjima inklinacije izmjeren je opet (iako manji) kuta odklona te je stoga zaključeno da se vjerojatno radi o nagibu slojeva, koji uzrokuju pomak kanala bušotine od vertikale. Bušenje je nastavljeno korištenjem krute stabilizacije (*engl. packed hole*) u cilju zadržavanja postojećeg kuta odklona bušotine.

Sastav alata za tehniku njihala:

- dlijeto promjera 0,2159 m (8 1/2");
- prijelaz promjera 0,1651 m (6 1/2");
- teška šipka, 1 komad promjera 0,1651 m (6 1/2");
- stabilizator bušaće kolone promjera 0,2159 m (8 1/2");
- teška šipka, 1 komad promjera 0,1651 m (6 1/2");
- stabilizator bušaće kolone promjera 0,2159 m (8 1/2");
- teške šipke, 13 komad promjera 0,1651 m (6 1/2");
- prijelaz promjera 0,1651 m (6 1/2");
- teške bušaće šipke, 9 komada promjera 0,1270 m (5").

Sastav alata za tehniku krute stabilizacije:

- dlijeto promjera 0,2159 m (8 ½");
- stabilizator pri dlijetu promjera 0,2159 m (8 ½");
- teška šipka, 1 komad promjera 0,1651 m (6 ½");
- stabilizator promjera 0,2159 m (8 ½");
- teška šipka, 1 komad promjera 0,1651 m (6 ½");
- stabilizator promjera 0,2159 m (8 ½");
- teške šipke, 14 komada promjera 0,1651 m (6 ½");
- prijelaz promjera 0,1651 m (6 ½");
- teške bušaće šipke, 9 komad promjera 0,1270 m (5").

Na dubini 1264 m ponovljeno je mjerenje kuta odklona koji je iznjsio 0°45'. Bušotina je uspješno vraćena u vertikalnost. Budući da u ovom kanalu nije nabušeno Temeljno gorje i kolektorske naslage , odlučeno je da se izbušeni kanal izolira cementnim mostovima te da se izbuši bočni kanal bušotine u smjeru sjeveroistoka prema kanalu bušotine Bunjani-1J.

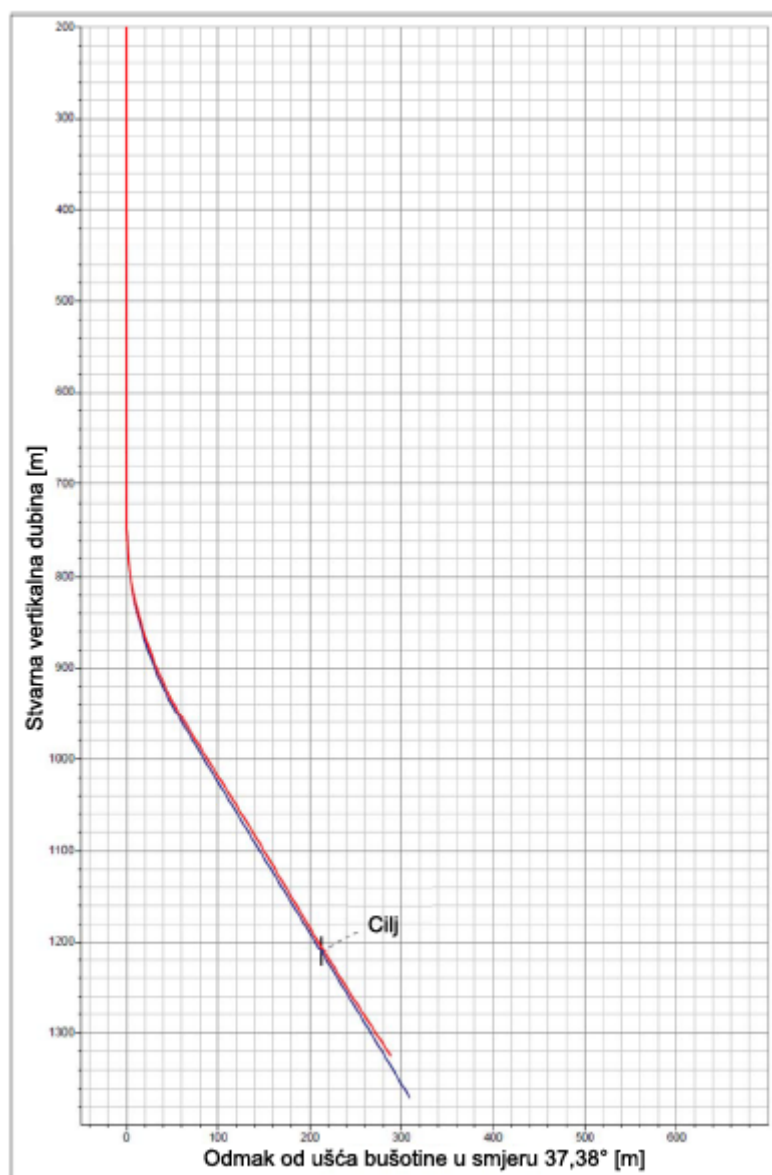
2.7. Zasijecanje bočnog kanala (*engl. sidetracking*)

Skretanje bušotine, odnosno zasijecanje bočnog kanala bušotine predstavlja u procesu bušenja namjerno bušenje novog kanala iz postojeće bušotine bočno (na stranu) od njenog glavnog prethodnog smjera (skretanje kanala bušotine) radi, na primjer, zaobilazanja dijela bušaće opreme koji je nepovratno izgubljen u bušotini (poput zaglavljene bušaće šipke) ili bušenja druge (produktivne) bušotine umjesto neproduktivne bušotine iz gornjeg dijela njena kanala. Skretanje kanala bušotine se izvodi koso usmjerenim bušenjem i specijalnim bušačim alatkama (na primjer, klinom za skretanje kanala).

Kao što je spomenuto u poglavlju ranije temeljem rezultata bušenja istražne bušotine Bunjani-2 Jug (Bn-2J), dana 16.07.2015. donesena je odluka o skretanju bušotine u smjeru sjeveroistoka, kako bi se nabušio primarni cilj, ležište nafte, u vrhu Temelnog gorja. Novi kanal bušotine imenuje se: Bunjani-2 Jug alfa, (Bn-2J α).

Nakon izrade sintetskog seizmograma i kalibracije te korelacije s okolnim bušotinama, izrađen je novi model brzina i izrađena nova strukturna karta.

Na slici 2-23 prikazana je planirana (plava boja) i ostvarena (crvena) trajektorija bušotine Bn-2J α .



Slika 2-23. Planirana i ostvarena putanja bušotine Bn-2Ja (INA-Naftaplin,2015.)

Nakon postavljanja cementnih mostova izbušen je bočni kanal u smjeru sjeveroistoka prema kanalu bušotine Bunjani-1J.

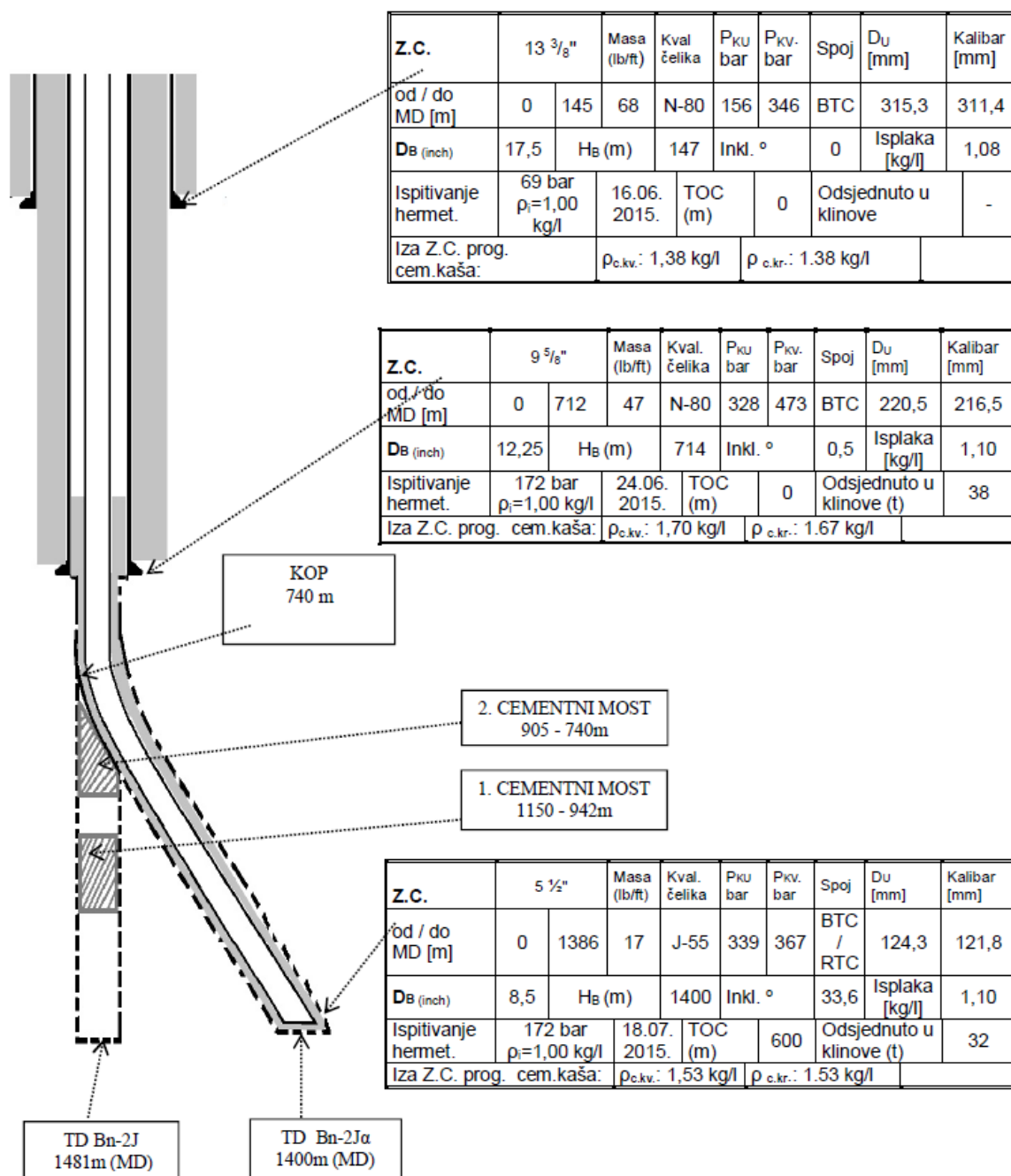
Nakon spuštanja upravljivih dubinskih motora i MWD-a, uslijedilo je pročišćivanje kanala te zasijecanje novog kanala bušotine promjera 0,2159 m (8 ½"). Nastavak bušenja usmjerenog dijela kanala bušotine dlijetom promjera 0,2159 m (8 ½") obavljeno je kliznim i rotacijskim načinom bušenja do konačne dubine bušotine od 1400 m.

Usmjereni dio kanala bušotine izbušen je slijedećim sastavom alata:

- dlijeto promjera 0,2159 m (8 ½");
- dubinski upravljivi motor promjera 0,1715 m (6 ¾");

- stabilizator 0,2223 m ($8 \frac{3}{8}$ ");
- prijelaz promjera 0,1651 m ($6 \frac{1}{2}$ ");
- nemagnetske teške šipke , 2 komada promjera 0,1715 m ($6 \frac{3}{4}$ ");
- prijelaz promjera 0,1715 m ($6 \frac{3}{4}$ ");
- teške šipke, 3 kom promjera 0,1651 m ($6 \frac{1}{2}$ ");
- prijelaz promjera 0,1651 m ($6 \frac{1}{2}$ ");
- teške bušaće šipke, 9 komada promjera 0,1270 m (5");
- udarač promjera 0,1651 m ($6 \frac{1}{2}$ ");
- teške bušaće šipke, 9 kom. promjera 0,1270 m (5").

Konačna skica bušotine vidljiva je na slici 2-24.



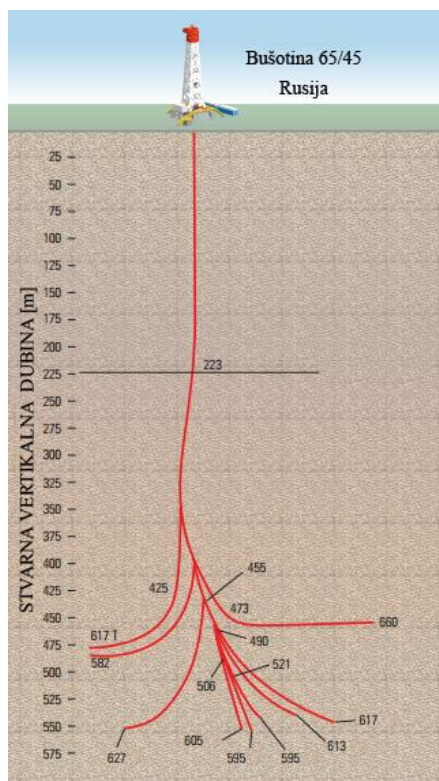
Slika 2-24. Skica bušotine Bunjani - 2 Jug i Bunjani - 2 Jug Alfa (INA-Naftaplin,2015.)

2.8. Višegranske ili višekanalne bušotine (*engl. multilateral wells*)

Višekanalna bušotina je bušotina s dva ili više bočnih kanala (*engl. lateral wellbore, lateral bore*) koji su izbušeni u jednom ili više ležišta. Bočni kanali se spajaju u jedan zajednički, glavni kanal (*engl. main bore*), koji se proteže do površine. Višekanalne bušotine opremaju se za istovremenu proizvodnju iz nekoliko zona.

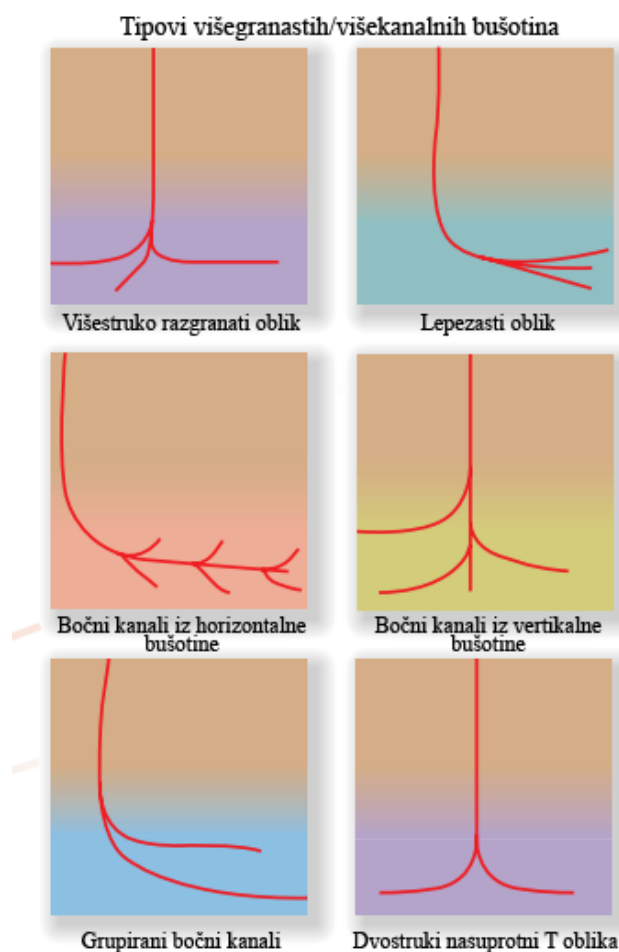
Višekanalne bušotine povećavaju kontakt bušotine i ležišta, povećavaju pridobivanje ugljikovodika kao i konačan iscrpak, smanjuju pridobivanje slojne vode, brže iskorištavaju ležište i omogućuju velike uštede novca. Nedostaci takvih bušotina su: veliki rizik u tehnološkom smislu opremanja bušotine, problemi prilikom kasnijeg opremanja, potreba za velikim brojem podataka o svojstvima ležišta, složenija i zahtjevnija izrada te ponekad onemogućen pristup bočnim kanalima.

Prva višekanalna bušotina izbušena je u Rusiji (slika 2-25), na polju Bashkira 1953. godine. Glavna bušotina (*engl. main borehead or mother well*) imala je 9 bočnih kanala što je rezultiralo povećanjem kontakta bušotine i ležišta za 5,5 puta i povećanjem proizvodnje 17 puta, dok se cijena cjelokupne bušotine povećala za samo 1,5 puta od izrade glavnog kanala (Bosworth et al., 1998).



Slika 2-25. Prva višekanalna bušotina - Bušotina 65/45 (Bosworth et al., 1998)

S obzirom na oblik trajektorije postoji više oblika višekanalnih bušotina, koje su prikazane na slici 2-26.



Slika 2-26. Oblici višekanalnih bušotina (Bosworth et al., 1998)

Višestruko razgranati oblik bušotine koristi se kod malih, ali isplativih, leća. Grupirani bočni kanali i bočni kanali iz vertikalne bušotine koriste se kada je više proslojaka nafte na različitim dubinama. Za razliku od prijašnjih, bočni kanali iz horizontalne bušotine koriste se kada je ležište velike debljine, a loših petrofizikalnih svojstava. Dvostruki nasuprotni T oblik može udvostručiti duljinu kanala bušotine u eksploatacijskoj zoni.

3. ZAKLJUČAK

Koso usmjereno bušenje ima raznovrsnu primjenu i nedvojbeno je da će u budućnosti imati još i veću. Prethodne nedostižne rezerve danas postaju dostupne i ekonomski isplative. Koso usmjereno bušenje postalo je potreba zbog praktičnih prednosti i ekonomske opravdanosti.

Jedna od prednosti usmjerenog bušenja je omogućavanje proizvodnje iz velikih proizvodnih intervala budući da se buši kroz ležište pod određenim kutom. To znači, što je bušotina pod većim kutom otklona veća količina ugljikovodika će se pridobiti kroz jednu bušotinu zbog toga što je kontakt bušotine s ležišnom stijenom veći.

Dubinski motori i rotirajući upravljivi sustavi danas se koriste kod usmjerenog bušenja, uz veliku efikasnost i preciznost. Dva su načina rada: klizni i rotacijski.

Primjerima iz domaće i svjetske prakse prikazan je opseg primjene usmjerenog bušenja bilo da se radi na kopnu ili u odobalju.

4. LITERATURA

1. Baker Hughes, 2002
URL: <http://assets.cmp.bh.mxmcloud.com/system/5b/be90e0e21e11e5a22e2bd1cd309cf2/ Navi-Drill Handbook 13th GM-GLB-DMTR-100274.pdf> (20.6.2016)
2. Bit Tooth Energy, 2013
URL: http://3.bp.blogspot.com/-M_02xT7l3QQ/UrdcVmU1BVI/AAAAAAAAAJC4/-oMjVR5ewuM/s1600/7.+Extended+reach+well+EM.png (17.5.2016.)
3. Bosworth, S., Saad El Sayed, H., Ismail, G., Ohmer, H., Stracke, M., West, C., Retnantom, A., 1998. Key Issues in Multilateral Technology, Schlumberger
4. British Petroleum, 2010. Deepwater Horizon Accident Investigation Report,
URL: http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/gom_response/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/Deepwater_Horizon_Accident_Investigation_Report.pdf (15.5.2016)
5. Carden, R.S., Grace R.D., 2007, Directional Horizontal Drilling Manual
6. Chen, D., 2006. Halliburton: Chapter 6 „Directional Drilling”
7. Dopuna I. za pojednostavljeni rudarski projekt za istražnu bušotinu Bunjani-2J. INA- Naftaplin Zagreb, 2015.
8. Drilling & completion final report - IVANA E, IVANA D, IVANA B - technical data. Zagreb: Inagip d.o.o., 2001. godina
9. Drilling & completion final report for development well Ika A-4 HOR. Inagip d.o.o., 2014. godina
10. Exxon Mobil, 2016. About extended reach technology
URL: <http://corporate.exxonmobil.com/en/engineering/extended-reach-technology/about/overview> (9.5.2016.)
11. Joshi, S.D., 1991, Horizontal Well Technology, PennWell Books, Tulsa, OK
12. KALČIĆ, A., 2011. Analiza havarije bušaće platforme Deepwater Horizon. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko- geološko- naftni fakultet
13. Krištafor, Z., 1977. Tehnoekonomske karakteristike primjene koso usmjerenog bušenja u INA-Naftaplinu na naftno-plinskom polju Bilogora. Diplomski rad

14. Nemčić, M., 2016. Tipična konstrukcija bušotina u eksploatacijskom polju Sjeverni Jadran. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko- naftni fakultet
15. New York Times, 2010. Gulf of Mexico Oil Spill
URL: <http://www.nytimes.com/topic/subject/gulf-of-mexico-oil-spill-2010> (9.5.2016.)
16. PetroWiki, 2016a. Extended reach wells
URL: http://petrowiki.org/Extended_reach_wells (9.5.2016)
17. PetroWiki, 2016b. Horizontal wells
URL: http://petrowiki.org/Horizontal_wells (9.5.2016.)
18. Pojednostavljeni rudarski projekt za istražnu bušotinu Bunjani-2J, INA-naftaplin, Zagreb, 2015.
19. Pojednostavljeni rudarski projekt izrade razradne bušotine Ika A-4 HOR plinskog polja Ika na eksploatacijskom polju ugljikovodika "Sjeverni Jadran", INA-naftaplin, Zagreb, 2014.
20. Pojednostavljeni rudarski projekt za razradnu bušotinu Kalinovac-21(Kal-21), INA-naftaplin, Zagreb, 2006.
21. PowerPak, Steerable Motor Handbook, Schlumberger, 2004.
URL: http://www.slb.com/~media/Files/drilling/brochures/directional_drilling/powerpak_handbook.pdf (20.6.2016.)
22. Rosneft ,2015. Sakhalin-1 Sets Another Extended Reach Drilling Record
URL: <http://www.rosneft.com/news/today/14042015.html> (15.5.2016.)
23. Shahsad, Y., Petroleum and Gas Engineering, 2016, Inaccessible locations
URL: <http://petroleumandgasengineering.blogspot.hr/2016/02/inaccessible-locations.html> (1.7.2016.)
24. Steiner, I., Boškov Steiner, Z., 1994. Tehnologija vodoravnog bušenja. Zagreb
25. The American Oil & Gas Historical Society , 2016. Technology and the "Conroe Crater"
URL: <http://aoghs.org/technology/directional-drilling/> (10.4.2016.)
26. TOTAL / NORDSØFONDEN, Environmental challenges
URL: <http://en.skifergas.dk/technical-guide/environmental-challenges.aspx> (15.5.2016.)

27. White, J., 2010. Relief well work ahead of schedule, but timetable for halting Gulf of Mexico oil spill stands. URL: http://www.nola.com/news/gulf-oil-spill/index.ssf/2010/06/relief_well_work_ahead_of_sche.html (10.5 2016)
28. Walker, M. W., 2012. Pushing the Extended Reach Envelope at Sakhalin: An Operator's Experience Drilling a Record Reach Well. *Journal of petroleum technology*, 64(05), SPE 151046, str. 118-121.
29. Završni izvještaj o bušenju i opremanju razradne bušotine Vesna - 2 ver. Zagreb: Inagip d.o.o., 2008. godina
30. Završni izvještaj o bušenju i opremanju razradne bušotine Vesna - 2 ver. Zagreb: Inagip d.o.o., 2008. godina
31. Završni izvještaj o bušenju i opremanju razradnih bušotina na proizvodnoj platformi Ana-2 dir i Ana-3 dir. Zagreb: Inagip d.o.o., 2008. godina
32. Završni izvještaj o bušenju i opremanju razradnih bušotina na proizvodnoj platformi Ana-2 dir i Ana-3 dir. Zagreb: Inagip d.o.o., 2008. godina
33. Završni izvještaj za bušotinu Kalinovac 10-R, CROSCO naftni servisi, Zagreb, 2000.
34. Završno izvješće za istražne bušotine Bunjani - 2 Jug (Bn - 2J) i Bunjani - 2 Jug alfa (Bn - 2J α). , INA-naftaplin, Zagreb, 2015.
35. Završno izvješće za proizvodnu (reentry) bušotinu Kalinovac-10R, INA-naftaplin, Zagreb, 2000.
36. Završno izvješće za razradnu bušotinu Kalinovac-21(Kal-21), INA-naftaplin, Zagreb, 2007.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarskogeološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Ivan Frković